



ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

提高炼油工业能效的机会

*Ernst Worrell, Christina Galitsky, Lynn Price, Nathan
Martin, Michael Ruth*

环境能源技术部

R.Neal Elliott, Anna Shipley, J.Thorne

美国能源效率经济委员会

2006 年 8 月

本项工作通过美国能源部，获得能源基金会与美国环境保护局的支持，以及陶氏化学公司慈善捐款的资助，合同编号为 DE-AC02-05CH11231。

免责声明

本文件编写工作由美国政府资助。同时，虽然本文件中的信息被认为是准确的，但是无论是美国政府或是其机构，加州大学董事会或是其雇员都既不对文件的准确性，完整性，信息的有用性，仪器，产品，以及披露的过程，或是其使用不侵犯私有权进行明示或暗示的保障，也不负法律责任。此处提到的任何具体商业产品，过程或有商标名称，商标，制造商名的服务，并不一定构成或暗示美国政府或其机构，加州大学董事会的认可，推荐，或偏袒其使用。作者在这里表示的观点和意见，并不一定代表美国政府及其机构，或加州大学董事会。

劳伦斯伯克利实验室是一个机会均等的雇主。

提高炼油工业能效的机会

劳伦斯伯克利国家实验室

环境与能源技术部

该报告介绍了炼油行业实施的节能技术和措施以及相关的节能、成本和二氧化碳减排等方面的情况。这些技术和措施包括目前全球范围内炼厂广泛应用的最新技术水平，还包括目前没有广泛应用或已接近商业化的先进技术。

本报告重点介绍了已商业化的技术改造措施，但许多技术已经应用于新建工厂。表 1~表 3 估算出了每项技术措施的单位产品成本和能耗。表 1 按工艺过程列出了耗电设备提高能效的措施和其应用领域。表 2 按工艺过程给出了提高能效的措施。表 3 给出了提高炼油工业能效措施的矩阵表。

降低能耗和减少二氧化碳排放的先进技术和措施包括膜技术、间壁式蒸馏、反应蒸馏和生物降解脱硫。在炼油工业中这些技术目前还没有商业化，或者正在扩大应用于新的领域（例如膜技术，间壁式蒸馏）。

最初收集这些信息是为了形成关于美国石油炼制工业的报告（*Worrell and Galitsky, 2005*），后来 *Martin (2000)*、*Worrell and Galitsky (2004)* 等又对报告作了补充。本报告中所提供的信息来源于公开发表的报告、期刊和国际上广泛应用的技术案例，但是节能、成本和减少二氧化碳排放等数据都是基于美国的实际情况计算出来的。

表1. 提高炼油行业能效措施的汇总

管理和控制	电机
能源监控 现场能源控制系统	适合型号的电机 高效电机 功率因数控制
能源回收	电压波动 调速电机 可变电压控制 更换传送带驱动
火炬气回收 能量回收 氢回收 氢夹点技术分析	
锅炉	泵
锅炉给水准备 改进锅炉控制 减少烟气量 减少过剩空气 改进保温性能 维护 烟道气热回收 锅炉冲渣水热回收 减少备用损失	操作和维护 监控 高效泵设计 适合型号的泵 多泵使用 减少叶轮级数或车削叶轮直径 控制器 调速电机 避免使用节流阀 合适型号的管路 减少滴漏 密封 干式真空泵
蒸汽配给	空压机
改进保温性能 保温维护 改进的凝汽阀 维修凝汽阀 自动化监控凝汽阀 泄漏修补 回收闪蒸蒸汽 冷凝水回收	维护 监控 减少滴漏 降低进口空气温度 露点最大许可压力 控制 合适型号的调节器 合适的管路直径 调速器 水预热系统的热量回收
加热器和工艺炉	风机
维修 设计控制 预热空气控制结渣 新型燃烧器设计	合适的规格型号 调速器
工艺整合	照明
总体夹点分析 水夹点分析	高效传送带
蒸馏	发电
优化操作程序 优化产品纯度 季节性压力调整 减轻再沸器负荷 升级蒸馏塔内部结构	照明控制系统 T8 荧光灯 金属卤化物灯/高压钠灯 高强度荧光灯 (T5) 电子镇流器 反射罩 安全出口标志用发光二极管
	热电联产(CHP) 气体膨胀透平机 高温 CHP 气化 (联合循环)

表2. 提高炼油工艺过程的能效措施

脱盐	加氢裂化装置
多级脱盐设备 交直流组合	能量回收 工艺整合(夹点技术)
原油蒸馏单元	工艺炉控制
工艺过程控制 高温 CHP 工艺整合(夹点) 工艺炉控制 空气预热 梯级原油蒸馏 优化蒸馏	空气预热 优化蒸馏
	焦化
	工艺整合(夹点技术) 工艺炉控制 空气预热
真空蒸馏单元	减粘裂化炉
过程控制 工艺整合 工艺炉控制 空气预热 优化蒸馏	工艺整合(夹点技术) 优化蒸馏
加氢炼制	烷基化
过程控制 工艺整合 优化蒸馏 新型加氢精制设计	过程控制 工艺整合(夹点技术) 优化蒸馏
催化重整装置	制氢
工艺整合 工艺炉控制 空气预热 优化蒸馏	工艺整合(夹点技术) 工艺炉控制 空气预热 重整前绝热
流化催化裂化	其它
过程控制 梯级余压回收发电 工艺整合(夹点技术) 工艺炉控制 空气预热 优化蒸馏 改进工艺流程	优化热储存槽 优化火炬气

表3. 提高炼油工业能效措施数据表

“行”表示炼厂中主要的工艺过程；“列”表示可以采用的各种提高能效措施

过程	能源管理	火炬气回收	能量回收	锅炉	蒸汽配给	热交换器	工艺集成	过程加热器	蒸馏	加氢控制	电机	泵	空压机	风机	照明	热电联产	发电	其它措施
脱盐	X											X						
常压蒸馏	X	X			X	X	X	X	X		X	X		X				
减压蒸馏	X				X	X	X	X	X					X				
加氢精制	X				X	X	X	X	X	X				X				
催化重整	X	X			X	X	X	X	X	X				X				
催化裂化	X	X	X		X	X	X	X	X					X				
加氢裂化	X	X	X		X	X	X	X	X	X				X				
焦化	X	X			X	X	X	X	X					X				
减粘裂化	X	X			X	X	X	X	X					X				
烷基化	X				X	X	X	X	X					X				
轻馏分	X				X	X	X		X									
芳香分	X				X	X	X	X	X									
氢	X				X	X	X	X		X				X				
电厂	X	X	X	8.1	X	X	X			X			X	X	X	X	X	X

注：“行”表示炼厂中主要的工艺过程；“列”表示可以采用的各种提高能效措施

总体措施

监督和控制系统。监督和控制系统在能源管理和减少能源利用中起着很重要的作用，包括辅助计量、监督和控制。此系统能够缩短执行复杂工作过程的时间，通常可以提高产品质量、数据的一致性，同时还可以优化操作过程。一般来说，许多工厂采用过程控制系统可以节约5%甚至更多的能源和成本。该系统

如果应用到那些没有采用过程控制系统的工厂，可带来节能量。目前许多炼厂为了提高能源利用效率，已采用了该先进的过程控制系统，。

虽然能源控制系统已经广泛应用于不同工业部门，但是系统仍有待改进，需进一步降低成本和提高节能量。例如，现场能源监测和管理总系统能提高同一地点各分厂之间的能源流管理。传统的做法是只监控和管理一个工艺过程或者有限数量的能源流。

采用能源监控系统所带来的节能量和投资回收期是随着各分厂之间和公司之间情况的不同而有着很大的变化。

实际上，目前已有不同工艺过程控制系统可适用于任何的工业工艺过程。评价控制能源系统在许多工业部门中使用的情况可以在大量的文献中找到，例如化工和石油炼制行业。表 4 给出了工艺过程控制系统种类的概况。

表 4. 控制系统的分类和典型的提高能效的潜力.

系统	特征	典型的节能率(%)
监测和目标管理	针对不同行业的系统，在不同国家和部门已成熟使用	4—17 (平均 8%) (根据英国的经验)
计算机集成控制 (CIM)	提高过程的总体经济效益，例如原料，生产能力和能源	> 2
过程控制	湿度，氧气和温度控制，空气流量控制“基于模糊逻辑学的知识”	2-18

注：在特殊的应用场合，这些估计数据也适用（例如照明能耗）。由于系统的重叠，节能量不能累加。
来源：(Caffal 1995, Martin 等, 2000)

现代化的控制系统不仅是为提高能效而设计的，更是为了提高生产能力、产品质量和生产线的效率而设计的。先进的控制和能源管理系统的应用目前处在不同发展时期，在任何工业部门都可见到。控制系统可以缩短停工期，降低维护成本，缩短工艺过程的时间，提高资源和能源利用效率，还可减少排放。许多现代化高效技术在很大程度上取决于精确的工艺参数控制，过程控制系统正在快速被广泛的应用。实际上，现代的工艺过程控制系统适用于任何一个工业工艺，对于一个炼厂，准确的说涉及到所有的工艺过程，包括炼厂燃料气和氢气的管理以及现场总体控制系统。然而，实施控制系统仍有巨大的潜力，更先进的控制系统也正在不断的进入市场。《碳氢工艺》杂志每半年对炼油工业控制技术的最新进展

进行介绍 (参见例如 HCP, 2001)。下述讨论了基于可获得的现场能源监测和管理总系统与单个工艺控制的案例, 来论证具体的应用情况和得到的节能效果。

工艺过程控制系统的应用取决于工艺的不同阶段。传感器价格便宜, 使用可靠, 并能进行实时分析, 这是一个相对独立、重要的发展领域。目前的研究方向主要侧重于光学、超声波、声学 and 微波系统的应用, 使传感器具有抗腐蚀性的能力 (炉中氧化性气氛或化学过程中的化学制品) 和耐高温的能力。根据工业工艺过程的数学 (基于“规则”)、中枢网络和“模糊逻辑”模型, 使控制系统中使用的传感器更能适应工艺过程条件的变化。

以控制系统为基础的中枢网络已成功应用于水泥 (窑), 食物 (烘烤), 有色金属 (氧化铝、锌), 造纸 (造纸原料、石灰窑), 炼油厂 (工艺过程, 现场), 钢铁工业 (电弧炉、轧机)。新的能源管理系统采用了人工智能、模糊逻辑 (中枢网络) 或基于数学“规则”的系统, 并利用监测数据和以往的经验来模拟“最好的”控制器。

工艺过程的智能系统 (KBS) 已经应用于系统的设计和诊断, 但是却很难应用于工业工艺过程。智能系统使用推理过程和管理策略中的规则把科学和工艺过程信息结合在一起。最近, 英国的甜菜制造厂的示范项目就是应用了基于预测性的控制系统模型, 其结果是能源成本降低了 1.2%, 同时产品收率提高 1%, 不合格产品从 11% 下降到 4%。该系统的简单投资回收期为 1.4 年 (CADDET, 2000)。

美国所有的相关部门正在进行先进传感器和控制器的研究, 这些研究有的是得到公共基金的资助, 有的是私人融资行为进行的研究。日本和欧洲也给予先进控制器极大的关注。“美国能源部的工业未来项目”试图开发更为先进的控制技术 (美国能源部-国际贸易局, 2000a)。传感器和控制技术在很多领域被认为是关键技术, 例如在能源效率、环境保护和监测等领域。控制系统的未来发展包括进一步开发新型传感器和控制系统, 进行商业化示范, 并在工业应用领域里广泛推广。

炼厂范围内最优化。现场总体能源监控和管理系统 (Kawano, 1996) 可以增加公司范围内不同工厂之间能源流的交换。从传统上讲, 一般只监测和处理一个过程或者有限数量的能量流。许多供应商提供现场控制系统 (HCP, 2001)。Valero

和 AspenTech 开发了一种适合于整个工厂的能量优化模型来优化介质、氢、水蒸气、燃料和电力的使用流程，并同能源监控系统整合。这个最优化系统包括了热电联产机组、催化裂化能量回收、优化的锅炉负荷分配以及选择蒸汽轮机或者电机来驱动压缩机。2003 年，美国得克萨斯州休斯顿 Valero's 炼厂应用了该系统，炼厂的总体能耗有望减少了 2%~8%。在整个 Valero 公司范围内，12 个炼厂每年可以节省资金 700 万到 2700 万美元(Valero, 2003)。

常压蒸馏。一些公司提供常压蒸馏的控制设备。Aspen 技术公司为常压蒸馏提供 70 余种控制设备和 10 种最优化系统。一般情况下，每桶原料可以节省 0.05~0.12 美元，投资回收期少于 6 个月。Key Control 公司为常压蒸馏提供一个专家顾问系统，该系统安装在常压蒸馏装置上可以降低能耗和减少火炬气，扩大生产能力，其投资回收期为 1 年。

葡萄牙 Petrogals Sines 炼厂的常压整理设备上安装了先进的控制装置，其产量提高了 3%~6%，投资回收期为 3 个月。

流化催化裂化。ABB Simcon, AspenTech, Honeywell, Invensys 和 Yokogawa 公司提供催化裂化控制系统，每桶原料可节省成本的范围在 0.02~0.40 美元之间，投资回收期为 6~8 个月。

Timmons 等人(2000)的报告介绍了将在线优化系统和现有的控制系统结合起来优化美国得克萨斯州 Corpus Christi 的 CITGO 炼厂的催化裂化装置的优点。Citgo 炼厂在日产 6.5 万桶原油的催化裂化装置单元上安装了现代控制系统和在线优化系统。两个系统的整合可以有效地提高了催化裂化操作的经济运行。在线优化系统的安装使催化裂化中每桶原料大概多节约 0.05 美元，同时也缩短了投资回收期 (Timmons 等，2000)。

位于意大利 Sanassazzo 的 ENI 炼厂于 2001 年在催化裂化装置上安装了 Aspen 技术公司的在线优化系统。结果是每桶原料节约成本 0.10 美元，投资回收期少于 1 年。

加氢精制。在加氢精制装置上安装多变量预测控制(MPC)系统在南非 SASOL 炼厂进行了示范。该系统的目的是为了提高产品收成率，同时使电厂成本最小化。使用该系统可以提高汽油和柴油收成率，减少火炬气，氢气消耗量减

少 12%，加热器的燃料消耗减少 18%(Taylor 等，2000)。再沸器耗燃料消耗的增加可以提高装置单元的生产能力。该投资回收期为 2 个月，提高了产量，直接和间接（即减少氢气的消耗量）地提高了能效。

烷基化。美国路易斯安那 Motiva's Convent 炼厂在日产 10 万桶的硫酸烷基化工厂安装了先进的控制系统。该系统旨在增加产量（大约 1%），减少电耗 4.4%，减少蒸汽用量 2.2%，减少冷却水用量 4.9%，减少化学品消耗 5%~6%（苛性钠 5.1%，硫磺酸 6.4%）（美国能源部—国际贸易局，2000a）。该软件包整合了化学反应分析、夹点分析、流程、能源利用和排放等信息，从而优化工厂的操作效率。虽然没有得到经济效益数据，但是只有安装了额外的计算机控制设备和软件，投资才能够全部回收。该程序可以从海湾有害物质研究中心和美国路易斯安那州立大学获得。可以提供烷基化控制系统的还有 ABB Simcon， Aspen 技术公司， Emerson， Honeywell， Invensys 和 Yokogawa 公司。一般情况下，控制系统可使每桶原料节约成本 0.10~0.20 美元，投资回收期为 6~8 个月。

能源回收

火炬气回收（或零燃放）。火炬气回收是对环境保护采取的一项措施。一般火炬气的燃放分为背景燃放（包括间断燃烧和连续燃烧）和抗爆燃放。在海上平台，火炬气燃放多达 50% 为背景燃放(Miles, 2001)。在炼油厂，根据每个炼厂不同的操作工艺，背景燃放的比例也各不相同，一般不超过 50%。最近，由于环保原因，美国加州旧金山海湾地区的炼油厂就火炬气排放的问题进行了讨论(Ezerksy, 2002)¹。讨论报告中重点指出了由于火炬气燃放增加，废气排放量要明显高于先前的环境质量估计的问题。从报告中还可以看出不同的炼油厂，以及同一炼油厂不同车间，在火炬燃放方面的差异。降低火炬燃放不仅能减少空气污染，而且能够提高能效，节省燃料，还能减少对火炬燃放的负面宣传。

通过改进工艺过程控制设备和新的火炬燃烧技术可以进一步减少排放。气体回收系统和低导燃气消耗的新型点火系统的开发，或者完全除去导燃气和新型弹道点燃系统的使用能大大减少火炬气的燃放量。开发和示范没有导燃系统的新型点火系统将会提高能效和减少排放。

¹ ChevronTexaco 在这份报告中以湾区空气质量管理行政区对炼厂火炬气燃排作出评论。该评论主要指出了 VOC 的计算和 Richmond 地区的 ChevronTexaco 炼厂火炬气燃排情况的解释 CA (Hartwig, 2003)。

通过改进回收系统，包括安装回收压缩机和收集储存罐可以减少火炬燃放。目前这项技术已经商业化运作了。不同的美国炼厂已经安装了火炬气回收系统，例如，美国密西西比 Pascagoula 地区的 ChevronTexaco 炼厂，甚至一些小炼厂例如美国阿肯色州的 Lion Oil 公司。对 Martinez 地区的美国 CA 公司（Shell 的全资子公司）的 Equilon 炼厂进行全厂范围内的评估后，发现火炬气回收有着很大的潜力。炼厂将安装新的回收火炬气的压缩机和储气罐以减少火炬气的燃排。目前没有有关的此火炬气回收项目的详细成本情况，因为此项目是炼厂一揽子方案的一部分。预计全部工程每年节省 5200 万美元，投资回收期为 2 年（美国能源部—国际贸易局，2002a）。

2001 年美国阿肯色州的 El Dorado 地区日产 6.5 万桶的 Lion Oil 炼厂安装了两个火炬气回收系统，使火炬气的燃排接近零(Fisher and Brennan, 2002)。只有火炬气的产出量超过设备回收能力时，炼厂才在应急的情况下将火炬气燃排。炼厂将回收的火炬气进行压缩，并用于炼厂的燃料系统。

目前还没有有关此种特殊装置的节能和投资回收期的信息。据安装和使用该回收系统的 John Zink 公司的情况来看，投资回收期或许少于 1 年。而且火炬气回收系统可以延长火炬嘴使用寿命和减少排放。

能量回收。各种工艺过程都是在加压中运行，这就可能有机会从烟道气的压力中回收能量。炼油厂回收的能量主要应用于流化催化裂化。然而，回收的能量还可以应用于加氢精制装置或其它在高压下操作的装置。现代化催化裂化设计采用了能量回收涡轮机或者涡轮膨胀机，以从压力中回收能量。回收的能量可以用来驱动催化裂化压缩机或者发电。催化裂化使用回收的能量的好处在于，在设备进行大修期间，其装置可以继续长时间地利用大量的较低压力的高温气体进行操作（大于 3.2 万小时）。利用透平机回收余能，并应用到催化裂化装置生产中已具有了丰富的经验。许多设计已市场化，最新的设计趋于更高效地回收余能。目前只有为数不多的几家设备供应商可以提供回收余能的透平机，其中包括通用电器公司。

世界范围内的许多炼厂已经安装了回收余能的透平机。最近 Valero 在休斯顿和得克萨斯州的圣体节和加利福尼亚（全美国）的威尔明顿炼厂改进了涡轮膨胀机。Valero 的休斯顿炼厂更新了能量回收透平机，提高了风机能力从而增加了催化裂化的生产能力。休斯顿炼厂重新评估了催化裂化装置使用回收余能的情

况，其结果是节约用电 22 兆瓦(Valero, 2003)，而且还向电网输电达 4 兆瓦。1998 年 10 月加拿大的埃德蒙顿炼厂用高效的涡轮机取代了老的涡轮膨胀机，每年大概节约 19 PJ (18 TBtu)。

能量回收涡轮机也能用于加氢裂化装置，可以通过回收反应器和分馏工艺阶段的压差来回收能量。1993 年荷兰符利辛根地区的道达尔炼厂在加氢裂化段安装了一个 910 千瓦的能量回收涡轮机来取代节流阀，在 160 个标准大气压下操作。能量回收涡轮机按每年 8000 小时算，可以发电 730 万度。在荷兰，其设备的投资回收期大概是 2.5 年(CADDET, 2003)。

汽化和分配

蒸汽应用于炼厂整个生产过程中。可以利用工艺过程、热电联产和锅炉中回收的余热生产蒸汽。现代蒸汽系统的精确规模和使用有很大不同，蒸汽系统的一般模式见图 1。

图 1 描绘的是蒸汽系统的示意流程。把处理后的冷却水输送到锅炉，并加热产生蒸汽。通过化学处理除去锅炉进水中的杂质，否则这些杂质将聚集在锅炉壁上。尽管锅炉进水经过了处理，但也会有存留杂质在锅炉水中积累。因此需要定期从锅炉底部排水即所谓的排污。产生的蒸汽顺着分配系统的管道输送到需要利用热的工序。如果工艺过程需要较低压力蒸汽的时候，蒸汽则通过一个减压阀降低压力。由于蒸汽是通过分配系统到达需要利用热的工序，在这过程中蒸汽被冷却，部分被冷凝。冷凝水从蒸汽阀排出，但阻止了蒸汽的通过。冷凝水可以被锅炉再循环利用，因此可以回收余热并节省锅炉新鲜进水。回收冷凝水和排污可以降低锅炉进水处理的成本。例如，Valero 休斯顿炼厂采用优化排污一年节省费用 213,500 美元(Valero, 2003)。

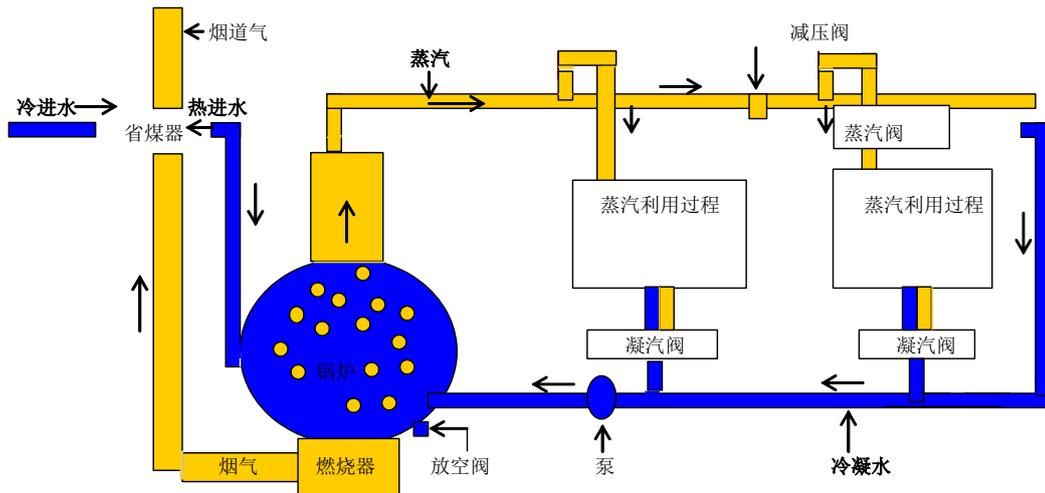


图 1. 蒸汽产生和分配系统示意图

炼厂蒸汽有着广泛的用途，最重要的是工艺过程加热、干燥或者浓缩、蒸汽裂化和蒸馏。不管采用什么方式利用蒸汽和从何地方得到蒸汽，提高蒸汽产生、分配和终端利用的效率是可行的。最近美国能源部的一项研究表明，炼厂蒸汽系统的总体节能潜力超过 12%（美国能源部—国际贸易局，2002b）。据估计，从近期来看，蒸汽产生、分配和热电联产提供了最为成本有效性的节能机会。这部分重点阐述了锅炉产生蒸汽（包括余热锅炉）和配送情况。表 5 总结了提高锅炉效率的措施，表 6 总结了蒸汽配送系统的措施。

蒸汽就象其它任何二次能源一样，生产和供应成本较高。应认真思考和评估蒸汽的利用问题。蒸汽通常是在大于需要的压力或者超过需要用量在一个特定的时间内产生的。这些低效行为可能导致蒸汽系统产生两种可能的结果，降低蒸汽压力或者把多余的蒸汽排放到大气中。因此，强烈建议需要认真的计算蒸汽系统的合适压力和生产进度表。如果不能降低蒸汽的压力，仍有可能利用涡轮膨胀机或者蒸汽透平机来回收余热。改进炼厂工艺整合性和提高蒸汽系统的管理水平可以减少过剩蒸汽的产生。许多炼厂运行多个锅炉。根据能效配置锅炉，也可以节能。对美国加利福尼亚州 Martinez 地区的 Equilon 炼厂（现在被 Shell 收购）的审计发现，根据效率（蒸汽轮机的最小损耗）计划蒸汽锅炉运行每年能够节能 540 万美元（美国能源部-国际贸易局，2002a）。

锅炉

表 5. 锅炉能效措施汇总

措施	节约燃料	投资回收期 (年)	其它效益
提高过程控制	3%	0.6	减少排放
减少烟道气	2-5%	-	便宜的排放控制
减少过剩空气	每减少 15% 的过剩空气, 节约 1%	-	
改进保温	6-26%	?	快速加热
锅炉维护	10%	0	减少排放
烟道气热回收	1%	2	
排空蒸汽热回收	1.3%	1 - 2.7	减少结构损害 (越潮湿的空气腐蚀性越大)
替代燃料	变化的	-	以增加排放为代价减少固体废物流

锅炉进水制备。根据锅炉进水的质量, 需要对其进行不同程度的预处理。处理进水可以采用很多技术。一种新技术是基于膜的技术, 在反渗透技术中, 利用半透膜加压对预过滤的水加压处理。在水处理过程中反渗透和其它的膜技术应用的越来越多(Martin 等, 2000)。膜处理过程非常可靠, 但是需要半年清理一次, 定期换膜以维持其性能。

美国犹他州盐湖城北部的 Flying J 炼厂安装了反渗透装置来减少水的硬度和减少锅炉进水的碱度, 代替热石灰水软化装置。此装置于 1998 年开始运行, 减少了锅炉污垢 (从 13.3% 到 1.5%) 和化学剂的使用, 减少了维护、污水处理费用 (美国能源部—国际贸易局, 2001a)。设备投资 35 万美元, 每年的效益大概是 20 万美元, 投资回收期小于 2 年。

改进工艺过程的控制。用烟道气监控器来保持合适的火焰温度, 监测 CO、O₂ 和烟气排放。烟道气中的氧含量是过剩的空气 (有意输入以减少排放和提高安全性) 和空气渗透 (空气渗透到锅炉中) 共同造成的结果。把氧气监控和进口气流监测器结合起来, 可以探测少量的泄漏。可以利用一氧化碳和氧气计量表可优化燃料/空气混合物, 以达到较高的火焰温度 (最好的能效) 和最低的排放。

改进的工艺控制系统的投资回收期约为 0.6 年(IAC, 1999)²。这项措施也许对小型锅炉太昂贵。

减少烟道气。过多的锅炉烟道气的产生通常是由于锅炉和烟道漏气，从而降低了锅炉的传热效率，增加了空气泵入量。锅炉漏气通常的情况下很容易修补，这可带来 2%~5%的节能量（美国能源部—国际贸易局，1998）。从此措施和烟道气监控措施中得到的节能量不能累加，因为这些措施都是解决同样的损失问题。

减少过剩空气。燃料燃烧使用越多的空气，就越浪费热量。为了安全和减少 NO_x 排放，空气量需要稍微高于按理想化学计量的燃料/空气比，当同时也以燃料的类型而定。对于燃气和燃油锅炉，过剩空气量约超过 15%较为合适(美国能源部—国际贸易局,1998；Ganapathy,1994)。如果锅炉维护状况不好，其过剩空气可达到 140%。将此比例减少到 15%，甚至没有安装连续的自动监控器，也可以节能 8%。

改进保温。新保温材料的效果更好，因为需要较少的热容量。如果保温改进和加热线路控制的改进结合使用，可以节能 6%~26%。也可以利用改进的控制系统来控制旧的耐火砖锅炉的产品温度范围。

维护。一个简单的、确保锅炉所有部件都能处在最好的操作性能的维修项目，可获得可持续的节能效果。在没有一个很好维护系统时，燃烧器和凝冷水回流系统可能磨损或者无法调节。这些因素在 2~3 年的时间可使蒸汽系统只能达到最初效率的 20%~30%（美国能源部—国际贸易局，2001a）。可能的节能估计平均为 10%（美国能源部—国际贸易局，2001a）。改善的维护系统也可以减少污染物的排放。

应该控制锅炉水管靠近燃烧壁容易结灰垢或锅炉水管结垢。与燃气或燃油锅炉相比，燃煤锅炉的灰垢和结垢问题更为严重。（即应该经常检查烧固体燃料如煤的锅炉，因为它们比液体燃料锅炉更容易产生灰垢）。试验表明，0.03 英寸（0.8 毫米）厚的炉渣层降低热传递 9.5%，而 0.18 英寸（4.5 毫米）炉渣层降低

² IAC 数据库给出了一系列研究案例，在这些案例中用到了特殊的技术。这个数据库还提供了大量的信息，包括每个案例的投资回收期。我们通过平均所有个案的情况来为每种技术计算总回收期。

热传递 69% (CIPEC, 2001)。对于结垢来说, 0.04 英寸(1 毫米) 积累层就会增加 2%的燃料消耗量(CIPEC 2001)。而且, 结垢甚至会导致锅炉管的报废。

烟道气热回收。从烟道气中回收的热量可以在省煤器中预热锅炉进水。虽然这种方法在大型锅炉中已经普遍使用, 但仍然有潜力回收更多的热量。省煤器壁的温度是造成烟道气热量回收好坏的制约因素, 此温度不应低于烟道气中酸性气体的露点温度。传统做法是使烟道气温度远远高于酸性气体的露点温度。但是, 由于水的热传递系数高, 省煤器壁的温度很大程度上取决于进水的温度, 而非烟道气的温度。所以, 在水进入省煤器之前, 应使之预热接近酸性气体的露点温度。根据这个道理设计的省煤器, 使烟道气的出口温度稍高于酸性气体的露点温度。锅炉废气每降低 25℃就会节约 1%的燃料 (Ganapathy 1994) 。因为废气温度已经相当低, 所有锅炉节能仅为 1%, 投资回收期为 2 年(IAC 1999) 。

从锅炉放排空物中回收蒸汽。当水从高压锅炉罐中排出, 由于压力减小将产生大量较低品级的蒸汽。这样的蒸汽可以用来采暖和预热锅炉进水。对于大型高压锅炉, 这样的损失可能小于 0.5%。据估计, 对于小于 100 GJ/时的锅炉来说, 此措施可以节约燃料 1.3%, 投资回收期为 1~2.7 年(IAC, 1999)。

减少备用损失。为防止正在运行的锅炉发生故障, 炼厂一般都有一个或者多个备用锅炉。通过改进燃烧器、助燃空气和锅炉进水的供应, 蒸汽生产过程实际上可以不必配置备用锅炉。通过安装一个自动系统, 在 12 分钟内锅炉可以达到满负荷运行。根据使用的锅炉类型, 安装控制系统和对锅炉进行改造可节约备用锅炉能耗的 85%。

在荷兰 Rozenburg 地区的 Kemira Oy 合成氨厂, 40 t/h 小型蒸汽锅炉采用了该系统, 使锅炉中备用蒸汽消耗从 6 t/h 降低到 1 t/h。每年节能 57 PJ(54 TBtu/a)。约需投资 27 万美元(1991 价格), 投资回收期为 1.5 年(CADDET, 1997 年)。

蒸汽配送

表 6. 蒸汽配送系统中提高能效措施

措施	节约的燃料	投资 回收期 (年)	其它优点
改进保温性	3%-13%	1.1	
改进凝汽阀	未知	未知	可靠性更强
凝汽阀维护	10-15%	0.5	
自控凝汽阀 ³	5%	1	
滴漏维修	3-5%	0.4	减小大修的需求
闪蒸蒸汽回收/冷 凝水回流	83% ⁴	未知	降低水处理成本
冷凝水回流	10%	1.1	降低水处理成本

当设计新蒸汽配送系统时，重要的是要考虑流速和压力下降两个因素(Van de Ruit, 2000)。因为这种考虑会降低使用粗管径蒸汽管的风险，这样不仅会增加成本，而且还导致更多的热量损失。使用太小管径的蒸汽管容易导致腐蚀和增加压降。设备使用和蒸汽量的需求是随着时间的变化而变化，这就有可能导致不能完全利用蒸汽管网系统和造成更多的热损失。然而，为了满足蒸汽量需求的变化，对系统进行优化，其费用太高不划算。最有利的成本有效性的措施是控制和关掉那些多余的蒸汽管线来减少蒸汽配送的损失。下文将叙述蒸汽管网系统的其它维护措施。

改进保温性。这项措施主要是使用保温性能更好的材料，或者对适合的保温材料进行仔细的分析。选择保温材料的关键因素有：低导热系数、温度变化下具有较好的尺寸稳定性、良好的抗吸水性和抗燃性。依据保温材料的实际应用，其它因素也可能很重要，例如当温度的区间发生剧烈的变化时，保温材料的耐温性、系统的波动性，耐压强度等也是考虑的重要因素(Baen and Barth, 1994)。改进现有蒸汽配送系统的保温性，对于整个系统来说，平均可以节能 3%~13%(美国能源部—国际贸易局, 1998)，平均投资回收期为 1.1 年(IAC, 1999)。美国能源部开发出 3E-Plus 软件，以对蒸汽系统保温优化性进行评价。

³ 除了正常的维修之外。

⁴ 包括从锅炉中闪蒸回收。虽然是本案研究中实际的节能量，但是好像太高而不能作为一般的节能参考数据。因此不包括在总体节能的估算。

保温维护。人们经常发现在对保温进行维护之后，并没更换保温材料。另外，某些隔热材料容易变脆或腐烂。因此，通过定期检查以及维护系统可以带来节能(CIBO, 1998)。根据工厂的具体情况的不同节能量和投资回收期也不同。

改进蒸汽阀。利用现代热静力学的原理改进蒸汽阀，可以降低能耗，同时提高可靠性。这样的蒸汽阀主要的优点是，当温度非常接近饱和蒸汽压的温度时，阀门打开（2℃以内），阀门打开后，就可以清除不可冷凝的气体；另一个优点是启动的时候打开，使蒸汽系统快速预热。在不同的蒸汽压力范围内，这样的阀门具有可靠和实用性(Alesson, 1995)。根据蒸汽阀的使用和维护状态，节能效果有很大的不同。

蒸汽阀的维护。对蒸汽阀进行简单的检查以保证能够正常运转，这可带来很大的节能量。如果不对蒸汽阀进行定期监控，15%~20%的蒸汽阀将会出现故障。在一些工厂中，多达40%的凝汽阀出现了故障。如果对蒸汽阀进行定期的系统检查和维护，据估计可节能10%(美国能源部—国际贸易局，1998; Jones 1997; Bloss, 1997)，投资回收期为0.5年(IAC, 1999)。这种措施的投资回收快，但是不常被采用，因为维护和能源成本是单独分开预算的。一些系统已经采用这种措施。对美国犹他州的盐湖城北部的Flying J炼厂审计中发现，通过维修蒸汽阀滴漏，每年节约14.7万美元(Brueske等，2002)。

蒸汽阀的自动监控。同蒸汽阀维护措施相结合，在蒸汽阀系统上安装自动监控仪器可以带来更多的节能量，而且不需要增加额外的成本。此措施只是更进一步的提高对蒸汽阀的维护，因为它可以快速发出蒸汽阀故障或者失灵的信号。据估计，利用自动监控可在维护蒸汽阀措施基础上，又多节省5%的能源，投资回收期为1年⁵(Johnston, 1995; Jones, 1997)。蒸汽系统采用维护蒸汽阀措施同时，也可以实施自动监控措施。平均来说，50%的蒸汽系统仍可实施蒸汽阀自动监控措施。

维修滴漏。如蒸汽阀一样，蒸汽管网本身常常发生滴漏，如果不进行定期检查和维修难以发现这些滴漏。定期检修和维护除了能降低3%的能源成本外，还可以减少大修的次数。(美国能源部—国际贸易局，1998)。平均来说，滴漏维修的投资回收期是0.4年(IAC, 1999)。

⁵根据英国的投资回收期为0.75年计算的。而美国的投资回收期较长，因为美国能源价格较低，但资金成本都是一样的。

回收闪蒸蒸汽。闪蒸蒸汽是当蒸汽阀把来自于高压的蒸汽配送系统中的冷凝水排出减压到常压状态时产生的。这种蒸汽可以用来采暖和预热进料水(Johnston, 1995)。此措施的应用潜力极大的依赖于管道系统的位置, 因为生产商不会重新建造一套完整的管道系统把低品位蒸汽输送到需要的地方, 除非在蒸汽阀附近使用。因此, 节能很大程度上取决于管道系统的位置。许多工厂将使用不同压力的蒸汽系统。在这种情况下, 从高压冷凝水系统中形成的闪蒸蒸汽可以输送到低压系统。

美国路易斯安那 Geismar 地区的 Vulcan 化学公司在自己的化工厂中的一个工序中实施闪蒸蒸汽回收措施。该工厂 100%全部回收了闪蒸蒸汽, 净节能 2.8% (Bronhold, 2000)。

冷凝水再利用。锅炉热冷凝水的重新利用不仅可以节能, 还可以减少对锅炉进水(处理过的)的需求。这将大大降低能源成本和降低购买化学品的成本, 使得安装一个回水管系统具有良好的前景。认真设计回收系统, 以减少能效的损耗 (van de Ruit, 2000)。据估计, 在没有冷凝水回流或冷凝水回流不足的地方, 最大节能量可达 10%(美国能源部—国际贸易局, 1998), 投资回收期为 1.1 年(IAC, 1999)。回收冷凝水的另外一个好处就是减少污垢的排放, 因为锅炉进水质量的提高。

热交换和工艺过程整合

在整个炼厂中, 加热和冷却是最基本的操作。在一个工艺过程中, 可能需要加热产生多种蒸汽和冷却多次。热交换器的优化使用和设计是提高能效的关键领域。

热传递—污垢。热交换器的使用贯穿于整个炼厂的生产中, 以从工艺过程中回收热能, 并将热传递给各工艺流程。除了将整个炼厂的热流整合高效运行外, 使热交换器高效运行则是另外一个重要节能领域。在一个综合炼厂中, 大多数工艺过程都是在高温高压下进行运行的; 因此, 各工艺过程间的热交换的管理和优化对于提高整体能效至关重要。在操作装置单元和管道中沉淀积累形成的污垢, 会导致不良的热传递, 因而需要额外的燃料消耗。例如, 美国的重质油加工过程中, 加热炉中的局部焦化沉积加剧, 致使炉效降低和设备故障潜力增多。但是, 随着重油加工程度的越来越深, 污垢也会随之增加。

污垢是由于在不同工艺过程的易变性和热交换器设计的共同影响下形成的。污垢形成也许是不同的机理综合作用的结果(Bott, 2001)。一些尝试着减少污垢的调研目前已经启动,包括利用传感器探测早期污垢的形成,利用物理和化学方法制造高温涂层(不改造设备),利用超声波以及改进设备设计和操作。国际上对减少和缓解污垢形成的研究仍在继续(Polley and Pugh, 2002; Polley 等。2002),重点研究了解结垢的原理以及换热器和反应器的设计。目前,各种减少污垢的方法主要包括工艺过程控制、温度控制、定期维护和清理换热器(机械方法或者化学方法)以及改造反应装置的管(Barletta, 1998)。

有关欧洲炼厂的研究表明,通过清理常压蒸馏的热交换器管和其他炉,总体上节能 0.7%,预计的投资回收期为 0.7 年。

在审计美国加利福尼亚州 Martinez 地区的 Equilon 炼厂(美国,现在被 Shell 收购)时,发现污垢是造成能源损失的最大因素。据估计,定期清理热交换器和保温维护,估计每年可以节省 1400 多万美元,总投资为 985 万美元(美国能源部—国际贸易局, 2002)。因此,简单投资回收期仅需 8 个月。

污垢—常压蒸馏。污垢是造成常压蒸馏效率损失的重要因素,对常压蒸馏而言,原油预热器特别容易形成污垢(Barletta, 1998)。针对污垢对日处理 10 万桶原油的蒸馏单元装置的影响做初步分析,发现每桶原油的处理需要额外 13.0 MJ 的热负荷(Panchal and Huangfu, 2000)。减少额外的热量需求可以带来巨大的节能量。

工艺过程整合。工艺过程整合或夹点技术是指对系统共同潜力的开发,这是任何系统本身所固有的,是系统多个组成部分共同的作用。在有着不同程度的加热和冷却需求的工厂,运用工艺过程整合技术将大大提高效率。

此项技术开发于 20 世纪 70 年代早期,现在已成为一种成熟的技术,并运用在连续操作的工艺过程中(Linnhoff, 1992; CADDET, 1993)。该技术按照热力学最优的原则连接热冷蒸汽(即不是所谓的“夹点”)。工艺过程整合就是要确保各组成部分以规模、功能和能力协调匹配。而“夹点”分析法则采取系统方法,确认和纠正任何的生产过程中的运行“瓶颈”(或夹点)(Kumana, 2000 年)。这项技术最初是在 20 世纪 70 年代后期,在英国曼彻斯特大学和其它一些地方开发的,当时是为了应对 20 世纪 70 年代的能源危机,以及通过优化热交换器网,满足炼厂和

化工厂减少蒸汽和燃料消耗的需要。从那之后，夹点技术一般应用于资源节约，而资源不仅包括资本、时间、劳动力、电力和水，而且包括具体的化学物质，例如氢气。

加热和冷却“组合曲线”的开发使夹点技术取得关键性进展，组合曲线总体上描绘了工艺的总热能需求和有效图形。当两条曲线绘制于一张温度与焓的关系图上时，它表示了工艺过程的夹点（温度最接近的点），热力学上加热或冷却需要最小量能源，这被叫作能源目标。此处采用的方法论主要包括：首先要找到目标，然后按照系统性程序设计换热器网络来达到目标。夹点最适宜的温度是取决于由资金和能量达到权衡水平，从而获得预期的投资回收期。无论对于新设计的换热网络还是改造现有系统，此方法都非常适用。

这方面的分析法都有文献记载(Kumana, 2000b; Smith, 1995; Shenoy, 1994)。与传统广为熟知的常规技术例如锅炉烟道气的热量回收，保温和蒸汽阀的管理相比，利用夹点分析法能挖掘更大的节能潜力。

夹点分析法以及具有竞争力的工艺整合工具在过去的几年里得到长足的发展。能源领域最重要的进步是采用了可替代的热回收工艺，例如热泵和热转换器，以及成批生产工艺过程的夹点分析的发展（换句话说，作为分析热整合的一个因素）。此外，夹点分析适合应用到设计新工艺和新设备，而工艺过程整合优于优化的换热器网络(Hallale, 2001)。甚至在新设计中，也能找到额外的提高能效的机会。夹点分析已经应用于水回收、效率和氢回收领域（见下文的氢夹点）。对于炼厂来说，水一般被认为是低成本资源，并低效使用。但是随着水处理标准规定更加严格和费用的增加，以及进料水处理的成本增加，工厂越来越重视水的成本问题。另外，炼厂消耗大量的能源去加工和运输水。因此，节约用水也会导致更多的节能。通过高效利用循环水的方式，水夹点分析法可以制定出最小用水量的目标。目前开发了相关软件以优化工厂水系统的投资和运行成本(Hallale, 2001)。开发了新的工具，并以综合的措施来优化水和能源的利用(Wu, 2000)。据报导，到目前为止，水夹点分析法主要应用于食品行业，水的节约用量减少了 50% (Polley and Polley, 2000)。Dunn and Bush (2001)报导了 Solutia 的化工厂应用水夹点技术优化水的利用，在净用水量不增加的前提下，节约的水可以用于扩大生产和扩大规模。目前没有针对石油加工行业的水夹点分析方面的研究。大型的石油公司，例如 BP 和埃克森美孚也只是在一些炼厂应用氢夹点分析法。

工厂范围的夹点分析。世界范围内 40 多个炼厂都应用工厂范围的夹点分析法, 通过把各种工艺过程热和冷却需求量进行整合, 以及将热电联产综合到分析中, 从而找出工厂范围内的、优化的电力供应。因为产品结构、物流和应用工艺过程的不断变化都可为提高能效提供更多新的机会, 所以应定期对现有炼厂和工艺过程进行工艺整合分析。

应用工厂范围的夹点分析的炼厂主要有: Amoco, Agip (意大利), BP, Chevron, Exxon (在荷兰和英国)和 Shell (一些欧洲工厂)。虽然经济潜力只有 10%~15%, 但是炼厂范围的分析表明, 节能量一般约为 20%~30%(Linnhoff-March, 2000)。20 世纪 90 年代后期, 欧洲的炼油厂实施了工厂范围的夹点分析。Solomon's EII 炼厂运行着 16 个工艺过程, 其中包括常压蒸馏, 减压蒸馏, 催化裂化, 焦化和加氢精制。分别对常压蒸馏、减压蒸馏、催化裂化、焦化和两个加氢精制工艺过程进行优化, 研究发现 EII 炼厂节能 7.5%。工厂范围的分析包括了热电联产, 其节能潜力为 16%(Linnhoff-March, 2000)。其他确认的节能潜力包括将背压透平机改为冷凝式汽轮机、改进中压和低压蒸汽管网综合性。经济上可行的项目约可节能 12%~13%。

化学品生产商 Solutia 在自己的 Decatur 工厂采用了工厂范围分析方法, 每年节省资金 390 万美元 (其中 270 万美元的投资回收期比较短), 在 Anniston 工厂每年节省 90 万美元, 在 Pensacola 每年节省 360 万美元(Dunn and Bush, 2001)。

工艺过程整合—热损失(减少)。一般来说, 工艺过程整合重点研究工艺过程和工艺过程之间的蒸汽流的有机结合。有时, 在两个工艺过程之间保留热量也可提高能效。这可以减少一个装置单元冷却或骤冷的能源需求, 而满足另一个装置单元预热的需求。通过安装自动过程控制装置将两个工艺过程中间的蒸汽流联系在一起, 就可以整合两个工艺过程。美国加利福尼亚 Martinez 地区的 Equilon 炼厂的审计表明, 每年可节省资金 430 万美元(美国能源部—国际贸易局, 2002a)。然而, 审计结果中没有包括投资和回收期的评估。

工艺过程整合—常压蒸馏。常压蒸馏工艺加工所有输入的原油, 因此是炼厂中最耗能的工艺过程 (除了那些接受其它炼厂通过管线输送来的中间产品的炼厂)。实际上, 在所有的炼制过程中, 常压蒸馏是耗能最多的工艺过程(Worrell and Galitsky, 2005)。耗能和常压蒸馏产品取决于加工原油的类型。许多跨国公司例如 ABB Lummus, Kellog Brown & Root, Shell Global Solutions, Stone & Webster,

Technip/Elf 和 UOP 可以提供新的常压蒸馏装置。《碳氢加工的精炼工艺》刊物中综述了现有的工艺过程设计。

常压蒸馏中工艺整合尤其重要，因为它在加工所有输入原油过程中耗能较大。早期的工艺整合研究表明，常压蒸馏(Clayton, 1986; Sunden, 1988; Lee, 1989)的燃料消耗减少了 10%~19%，投资回收期小于 2 年。将常压蒸馏和减压蒸馏结合，与没有采用工艺整合相比，可节省燃料 10%~20%(Clayton, 1986; Petrick and Pellegrino, 1999)，且具有较短的投资回收期。实际上投资回收期很大程度上取决于炼厂布局，需要对换热器网络进行改进和燃料价格的变化。

澳大利亚 BP 的 Kwinana 炼油厂的常压蒸馏工艺过程就已经整合的相当不错，从而使得进一步整合的经济潜力已经非常小了。分析表明，常压蒸馏有着巨大的节能潜力，但是投资回收期约为 6 年。但是，同渣油裂解单位装置相整合可以减少 35%~40%的热电联产，简单投资回收期为 1.6 年(Querzoli, 2002)。

工艺过程整合—流化催化裂化。流化催化裂化在现代炼厂中也是一个耗能巨大的过程，甚至超过 6%。大多数正在使用的催化裂化设备是 20 世纪 70 年代设计制造的。目前，很多供应商已将更高效装置的设计市场化了。装置设计的变化是随着反应器、使用的催化剂类型和热整合的程度而变化的。在《碳氢加工的精炼工艺》刊物中总体综述了有获得的工艺流程设计 (HCP, 2000)。主要的设备供应商有 ABB Lummus, Kellog Brown & Root, Shell Global Solutions, Stone & Webster 和 UOP。理想的设计要基于原料加工的类型、期望的产品结构和产品的质量。工艺过程的能效是选择新的催化裂化装置时必须考虑的因素。

对现有的催化裂化装置来说，可以通过增加热整合和回收、改进工艺流程和能量回收等措施来提高能效。催化裂化有很多工艺过程需要加热（汇）或冷却（源）。热汇和热源结合的越好，催化裂化的能耗就越低。老的催化裂化装置没有优化的换热设备，特别容易损失低温热量，而低温热量又可以用来预热锅炉进水或者冷进料。但是，通过更好的热汇和热源结合和应用夹点技术原理，以及通过改进温度水平和加热/冷却负载的有机结合，则可降低能耗。许多学者报导了催化裂化利用夹点分析法和工艺过程优化(Hall 等, 1995; Golden and Fulton, 2000)。合适的结合取决于加工的原料和产量。此外，热交换器的经济性决定了是否需要这样的结合。

Al-Riyami 等(2001)研究了罗马尼亚炼厂的催化裂化单元装置进行工艺过程整合的机会。该套催化裂化单元装置是由 UOP 公司制造的, 用来转化减压瓦斯油和常压瓦斯油。已确认了不同的设计方案来减少电力消耗。对催化裂化研究认为, 可以将电耗降低 2.7%, 投资回收期为 19 个月。投资回收期的计算取决于催化裂化单元装置的设计和工厂布局, 但是这里只包括了热交换器, 所以对其它的工厂而言, 投资回收期也许更长。

对在英国的一家炼厂进行了能效现场分析。结果发现, 在静电沉降器之前安装一个废热锅炉, 回收催化裂化工艺过程中的热量, 结果每年节约 21 万美元的资金, 投资回收期为 2 年(*Venkatesan and Iordanova, 2003*)。

工艺过程整合—流化催化裂化—过程物流的改变。随着时间的推移对产品质量要求和催化裂化原料也会随之发生变化。工艺流程设计应该在变化中保持最优化。增加或者改变中段回流的数量可以提高催化裂化的能效, 因为它增加了热量的回收(*Golden and Fulton, 2000*)。中段回流的某个变化也许会影响热汇和源的潜在结合。

新的设计和操作工具能够优化催化裂化操作条件, 从而提高生产率。*Petrick and Pellegrino (1999)*引用的一项研究表明, 对设备和操作条件进行适当的改进来优化催化裂化装置, 可使每桶原油加工生产高辛烷值汽油和烷基化物的生产率从 3% 提高到 7%, 极大地节约了能量。

工艺过程整合—重整。在英国的一家炼厂, 对提高能效进行现场分析。审计表明, 提高两个重整炉的废热锅炉的省煤器性能可以提高能效。该变化可使每个重整装置每年节省资金 14 万美元, 投资回收期为 2 年(*Venkatesan and Iordanova, 2003*)。

工艺过程整合—焦化。1999 年南京金陵石化公司对一个焦化装置模拟和优化时, 确认了更加有效的整合过程热物流的方法。如果改变柴油机中段回流, 每年节省能源成本 10 万美元(*Zhang, 2001*)。

工艺过程加热器

工艺炉和锅炉消耗了超过 60% 的炼厂燃料, 平均热效率为 75%~90% (*Petrick 和 Pellegrino, 1999*)。在考虑不可避免的热损失和露点的情况下, 理论最

大效率大约为 92%(HHV) (Petrick and Pellegrino, 1999)。这表明工艺炉和燃烧器的能效可平均提高 10%。

通过提高加热器的性能、提高火焰发光度、安装换热器或者空气预热器以及改进过程控制,可以提高加热器的效率。新设计的燃烧器改善了燃料和空气的混合,以及提高了热交换的效率。目前,提出许多不同的概念来达到上述目标,包括贫气预混合燃烧器(Seebold 等, 2001), 漩涡燃烧器(Cheng, 1999), 脉动燃烧器(Petrick and Pellegrino, 1999)和回转式燃烧器(美国能源部—国际贸易局, 2002a)。同时,设计燃烧器和加热炉时,应考虑到安全性和环保等问题。但是最重要的是减少 NO_x 排放。几乎在所有的炼厂都有必要改进 NO_x 的控制,以达到空气质量标准,特别是随着很多炼厂建在人烟稀少偏远的地方。

维护。定期维护燃烧器、通风控制和热交换器对保持过程加热器的安全操作和高效运转具有举足轻重的作用。

通风控制。过程加热器维护不好就会含有过剩空气,降低了燃烧器的效率。必须控制过剩空气,使氧含量控制在 2%~3%,以确保完全燃烧。

美国得克萨斯州休斯顿的 Valero's 炼厂安装了新的控制系统,减少常压蒸馏工艺的三个加热炉的过剩燃烧空气。此控制系统使加热炉中过量氧气保持在 1%,而不是通常的 3%~4%。该系统不仅减少了 3%~6% 能耗,而且减少了 10%~25% NO_x 排放,提高了燃烧器的安全性(Valero, 2003),其节约成本为 34 万美元。美国 12 个 Valero 炼厂将在 94 个过程加热器上安装使用相同的系统,预计每年可节省 880 万美元。

对美国加利福尼亚州 Paramount 地区的 Paramount 石油公司的沥青厂审计表明,6 个过程加热器都存在着过剩空气问题。因此,定期维护(每年两次)能减少过剩空气,每年可节省开支 29 万多美元(每年接近 10 万 GJ)。该措施的简单投资回收期仅为 2 个月(美国能源部—国际贸易局, 2003a)。

在美国能源部的共同资助下,对美国加利福尼亚 Martinez 地区的 Equilon 炼厂(现在被 Shell 收购)审计表明,减少过剩空气和通风空气每年可节省开支近 120 万美元。美国犹他州盐湖城北部的 Flying J 炼厂进行相同的审计,通过控制

烟道气的氧气来控制加热炉空气的进入，结果每年节省 10 万美元(Brueske 等., 2002) (美国能源部—国际贸易局, 2002a)。

空气预热。空气预热是提高效率和增加过程加热器能力的有效方法。加热炉的烟道气用来预热助燃空气。每降低出口烟道气 1.7°C (35°F)就会使加热炉增加 1%的热效率(Garg,1998)。一般节省燃料 8%~18%，如果烟道气温度高于 340°C (650°F)以及加热器的规模为 50 GJ/hr 甚至更高，其节能效果更具经济可行性。烟道气中的硫含量决定了适宜的烟道气温度，以减少腐蚀。当增加一个预热器，就得重新评定燃烧器的最佳效率。炼厂助燃空气预热装置的投资回收期一般估计为 2.5 年。但是，其成本很大程度上取决于炼厂布局和加热炉的结构。

减压蒸馏。对英国的一家炼厂进行能效的现场分析。该炼厂有 3 套减压装置，其中的一套仍在使用自然通风，同时也没有热回收装置。通过安装助燃空气预热器、利用热烟道气和额外的 FD 风机，烟道气温度减少至 240°C (470°F)。每年节省能源成本 10.9 万美元，投资回收期为 2.2 年(Venkatesan and Iordanova, 2003)。

新型燃烧器。在很多地区，新的空气质量排放标准要求炼厂减少加热炉和锅炉的 NO_x 和 VOC 排放。在不需安装昂贵的选择性催化还原烟道气处理设备的情况下，新的燃烧器技术能够显著的减少 NO_x 和 VOC 的排放，既节约了成本，同时也有助于减少选择性催化还原的用电费用。

基于贫气预混合概念，ChevronTexaco 和 John Zink Co 合作为炼厂开发出一种新型低 NO_x 排放的燃烧器，使 NO_x 排放从 180 ppm 降低到低于 20 ppm。美国加利福尼亚州的 ChevronTexaco's Richmond 炼厂在未使工艺炉停工的情况下，在常压蒸馏、减压蒸馏和重整反应器上安装了这种燃烧器。该燃烧器还用于改造蒸汽锅炉。在重整炉装置上安装该燃烧器，减少了超过 90%的排放量，同时去除了选择性催化还原的需要。这使炼厂节省 1000 万美元的资本成本以及每年 150 万美元的选择性催化还原设施的运行成本 (Seebold 等, 2001)。运行成本包括了选择性催化还原设备的压缩机和风机的用电成本。由于一些操作规程的改变，为了操作新的燃烧器还要对操作工人进行再培训。

蒸馏

蒸馏是炼厂中耗能最多的工艺过程之一。蒸馏在整个炼厂中被用于分离产品，或者从常压蒸馏/减压蒸馏中分离，或者从转化过程中分离。对进入蒸馏塔的物质进行加热，根据沸点的不同分离出不同产品。提高能效关键在于加热部分以及优化蒸馏塔。

操作程序。优化蒸馏塔的回流比可以显著的节能。原料性质决定了蒸馏塔的效率。如果原料特性随着时间或者同设计条件相比发生了变化，就可以提高运行效率。如果运行条件发生了变化，就应计算出新的优化运行程序。回流设计应与每班操作人员的实际回流比相比较。为了提高能效，蒸汽和/或燃料强度应与回流比、产品纯度相匹配。

检查产品纯度。许多公司往往追求纯度很高的产品。当然，当纯度达到 95% 时就可以了，如果使其达到 98% 就没有必要了。在这种情况下，应该慢慢增加回流比直到达到要求的纯度，这样就减轻再沸器的负荷。这种改进不需要或者需要较小的投资(Saxena, 1997)。

季节性调整运行压力。对于那些位于冬天寒冷气候的工厂来说，应根据冷水温度降低情况来减小运行压力(Saxena, 1997)。然而，这不适合真空蒸馏和其它在真空下操作的分离过程。这样运行的变动一般不需要任何投资。

减轻再沸器负荷。再沸器作为蒸馏过程的一部分占了炼厂大部分的能耗。用冷却水降低冷凝器的温度，可以减小再沸器的负荷。对一个日产 10 万桶的常压蒸馏单元装置中使用冷却水的研究表明，假设冷却水温是 10°C (50°F)，冷却负荷增加了 5% (2.6 GJ/hr 或 2.5 MBtu/hr)，节约的燃料约为 12.8 GJ/hr (12.2 MBtu/hr) (Petrick and Pellegrino, 1999)。投资回收期估计为 1~2 年，但不包括蒸馏塔中塔盘设计的费用。该项技术目前还没有证实可以商业化运行，可是也可以用于其它的蒸馏过程。

升级改造蒸馏塔内部构件。损坏的或者是旧的内部构件会增加操作费用。随着内部构件的损坏，效率下降，压降升高。随着时间的推移，这将导致蒸馏塔在较高的回流比下运作，因而能源成本也会随之增加。使用新的塔盘或者增加一种高性能的填料，可使蒸馏塔恢复到刚安装时的状态。如果运行条件严重偏离了设

设计的运行条件，那么该投资回收期将会延长。

新塔盘设计目前已成熟，并开发以满足多种不同的需求。当替换塔盘时，通常应考虑新的高效塔盘。新的塔盘设计可以提高分离效率和减小压降，从而降低能耗。当设计新的塔盘时，应该考虑优化塔盘数目。

汽提塔优化。蒸汽被注入到汽提塔的生产过程中。蒸汽汽提塔应用在各种工艺，尤其在常压蒸馏中应用较多。操作中汽提蒸汽温度可能过高，用量也可能过大。优化这些参数能够极大的减少能耗。对于特定的装置，该优化属于工艺过程整合（或夹点）的一部分。

改进原油蒸馏。Technip 和 Elf (法国)合作开发了用于原油蒸馏单元装置的能效措施，他们重新设计了原油预热器和蒸馏塔。原油预热组分为几个步骤，在不同温度下回收馏分。重新设计蒸馏塔使之在较低压力下运行，改变的产出与炼厂中其它过程及产品结构相关联。该设计减少燃料消耗，并达到更好的热整合(减少常压蒸馏的净蒸汽产量)。Technip 认为，与传统常压蒸馏相比，可以减少 35% 的燃料消耗(Technip, 2000)。该技术于 1927 年被用于 Leuna 地区的（德国）新建炼厂中，还将用于另外的正在建设中的欧洲炼厂。由于常压蒸馏-产量的变化和中间流需求的变化，改进的原油蒸馏特别适用于新建的或大型的原油蒸馏扩展工程。

间壁式蒸馏。1949 年开始提出间壁式蒸馏塔的概念，但是直到最近才开始实用和商业化的设计。自 20 世纪 90 年代早期工艺过程整合研究和其它的研究工作以来，才有了第一个间壁式蒸馏塔的商业化应用(Hallale, 2001)。间壁式蒸馏塔是把两个传统的蒸馏塔组合成一个，增加了热传递。间壁式蒸馏塔可以节省 30% 的能源成本，与传统蒸馏塔相比，其特点是资本成本较低(Schultz 等, 2002)。各种公司(Kellog Brown & Root, Krupp Uhde, Linde, Sumitomo 和 UOP)利用间壁式蒸馏塔的原理分离产品。德国 BASF 最早使用间壁式蒸馏塔，在他们的化工厂运行着世界上最多的间壁式蒸馏塔。在 BP, Veba Oel (德国), Sasol (南非) 和 Chevron 的炼厂都在使用间壁式蒸馏塔。目前间壁式蒸馏塔的使用仅限于从汽油中脱苯或者从汽油生产过程中分离更轻的馏分。有必要对间壁式蒸馏塔用于石油炼制工业中主要的蒸馏过程进行深入研究。

隔膜。膜技术将来有可能替代蒸馏。在炼油厂，这项技术已经开始用来回收氢气（见氢气管理和回收部分），但是如何在其它分离过程中用还处在研究中。美国能源部资助了一项关于膜技术深度研究的项目，该项目主要研究了在不同分离过程（气/气，液/液）中膜技术的应用，研究还涉及到了最新膜技术以及在炼油工业中的应用前景(Dorgan 等, 2003)。开发能够适应炼油过程中各种环境变化的膜材料，还有待进一步研究，即便如此，Dorgan 等(2003)仍然认为，膜技术将来一定能够应用于炼油厂。膜技术也应作为具体工艺过程的一部分，因为膜技术的使用可以保证最大的节能潜力。

反应蒸馏。在一个反应器中把化学反应和分离过程结合在一起，可以降低资金成本和提高能效。反应蒸馏是替代传统的反应-蒸馏流程的一种很有前途的工艺 (Sundmacher and Kienle, 2003)。此外，迅速移除反应产物有助于反应均衡的移动，可以提高反应转化率。反应蒸馏主要用于醋酸盐类的生产（例如甲基叔丁基醚）(Moritz and Gorak, 2002)。很多研究机构和技术开发者致力于反应蒸馏应用到新的领域。在美国，研究人员开发了一种新的反应蒸馏工艺，该工艺可用于生产清洁的高辛烷值的异构化产物(美国能源部—国际贸易局, 2001b)。在欧洲，设备生产商和高校开展了合作研究，其目的主要致力于提高对反应蒸馏的了解，以及开发用于设计新设备的模拟工具。其它新的研究包括负载催化剂(Babbich and Moulijn, 2003)的单片电路，减少催化剂损失(Goetze and Bailer, 1999)，单片电路导致较低的压降。

氢气的管理和回收

氢气在炼厂的不同过程中被广泛的利用，例如加氢裂化和加氢精制脱硫。生产氢气是一个高能耗过程，采用石脑油重整反应器和燃气重整反应器。这些生产过程和其它过程也会产生大量气体，这些气体中含有一定量的氢气，但这样的氢气还不能用于工艺过程，同时转化过程还会产生蒸馏副产品。另外，不同的工艺对氢气原料的质量（纯度）有不同的要求。减少重整反应器中氢气组份的需要将会减少能源消耗，还可以减少外购天然气的需要。炼制过程使用天然气是非常昂贵的，尤其是最近。炼厂中，氢气管理的技術主要包括氢气过程整合（或氢气的梯级利用）和氢气回收技术(Zagoria and Huycke, 2003)。现有氢气系统的更新改造可以增加氢气处理能力 3%~30%(Ratan and Vales, 2002)。

氢气整合。氢气系统整合和优化是夹点分析法在炼厂中的一项全新而又极其重要的应用(见上文)。在炼厂中,纯净的氢气从重整反应器流向其它工艺过程,因此大多数炼厂的氢气系统整合度较低。但是随着氢气用量的增加,尤其是加利福尼亚的炼厂,则就要更多的考虑其氢气的价格问题。利用在夹点分析的组合曲线方法,氢气生产和应用情况就一目了然。根据氢气流的不同质量,可确认不同氢气来源和用途的最佳匹配。这样,使用者就可以据此选择合理的、最划算(成本有效性)的技术来提纯氢气。近来,分析技术的改进解决了压力问题,以降低压缩的能源需要(Hallale, 2001)。除了考虑生产成本、燃料消耗、压缩耗电外,该分析方法还考虑了管道费用。在新的和改造项目中也可以应用该技术。

美国加利福尼亚州 Carson 地区的 BP 炼厂与加利福尼亚能源委员会共同开展了合作项目,对大型炼厂进行氢气的夹点分析。分析表明,总的运行成本节约潜力为 450 万美元,但是炼厂决定采用成本更为有效性的、每年可节约 390 万美元的一览子计划。作为美国加利福尼亚州 Martinez 地区的 Equilon (Shell) 炼厂整体分析的一部分,氢气系统分析被包括在内(美国能源部—国际贸易局, 2002a)。这就使得炼厂能够找到节能的潜力。某炼厂发现,在不用投入资金的情况下,在氢气系统中,每年可节约 600 万美元 (Zagoria and Huycke, 2003)。

氢气回收。氢气回收技术是提高氢气回收效率、降低氢气回收成本、提高氢气纯度的重要开发领域。通过把低纯度的氢气输送到氢气车间,可以间接的回收氢气 (Zagoria and Huycke, 2003)。也可以通过把废气输送到制氢厂已有的氢气提纯器回收,或者另外再安装一套提纯器,来回收废气中的氢气。从加氢裂化、加氢精制、焦化或者催化裂化工艺过程中所排出的废气适合用于氢气的回收。回收气中的氢气含量不仅决定了氢气的可回收性,而且还有压力,杂质(污染物)(即硫、氯和石蜡),以及尾气组分(C_5+)含量也起着决定性的作用(Ratan and Vales, 2002)。废气流来源的特性也会影响回收技术的选择。氢气回收所节约的成本约是生产氢气成本的 50%(Zagoria and Huycke, 2003)。

可以利用不同的技术回收氢气,其中最常见的是压力转换和温度转换吸收、低温蒸馏和膜技术。分离技术的选择是由期望获得的氢气纯度、压力、温度以及氢气的回收程度而决定。不同的设备制造商提供不同类型的氢气回收技术,包括 Air Products, Air Liquide 和 UOP 公司。一般来讲,当流体流速较低时,膜技术是最低成本的技术选择,但当流体流速较高时则没必要采用膜技术 (Zagoria 和 Huycke, 2003)。当氢气流速较高时,一般选择 PSA 技术。PSA 是从重整反应器

产出气中分离氢气的常用技术。全世界有数百套用于从不同气体流中分离氢气的 PSA 装置。如果想同时回收其它气体（如 LPG），可以使用低温气体回收装置。低温气体回收装置生产中等纯度的氢气（可达 96%）。

膜技术是炼厂回收氢气很具吸引力的一种技术。如果可回收产品的氢气含量超过 2%~5%（或者最好是 10%），那么，氢气回收就具有经济性(Baker 等, 2000)。新的膜技术在炼厂和化工厂的应用仍处于开发阶段。约在 20 年前，利用膜技术回收氢气第一次在合成氨厂进行了示范 (Baker 等, 2000)，此后，膜技术不断的被应用于各种最新建的工厂中。炼厂中各种气流的成份各不相同，所以，针对不同的气流需制造不同的膜，以达到最佳的回收效果。膜制造厂已经示范了从加氢裂化废气中回收氢气。许多供应商为炼制工业提供膜技术，Air Liquide, Air Products 和 UOP。Air Liquide,和 UOP 公司已在全世界销售了 100 多套膜技术回收氢气的装置。开发低成本和高效膜技术目前已成为一个研究的领域，以提高氢气回收的成本有效性，并能够从低浓度气流中回收氢气。

Oklahoma 的 Ponca 城市的炼厂（美国，现在被康菲石油公司收购）安装了膜系统，从加氢精制过程排放的废气中回收氢气，但节能无法量化 (Shaver 等, 1991)。另外一项早期的研究是在加氢裂化装置上安装一套膜技术氢气回收装置，结果表明：该技术可以减少 6%的氢气制备。

氢气的生产

重整-绝热预重整器。如果工厂产生过剩的蒸汽，则有必要在重整器上安装预重整器。绝热蒸汽重整利用高活性的镍催化剂，再利用重整器中对流部分的废热(900°F)，重整烃类原料，可以增加 10%的产量(Abrardo and Khurana, 1995)。荷兰 Rozenburg 地区的 Kemira Oy 合成氨厂安装了绝热重整反应器，节能 4%，投资回收期为 1~3 年(Worrell and Blok, 1994)。ChevronTexaco 在为美国加利福尼亚 El Segundo 炼厂设计新氢气工厂时，加上一套预重整装置。在不增加额外能耗的情况下，使用该项技术可以增加生产能力，还可以增加重整原料选择的灵活性。当一个炼厂脱硫的需求扩大或转换使用更重质原油时，炼厂不得不面临着氢气需求量增加的问题，在这种情况下，此技术就更具有特别的吸引力。许多供应商提供预重整装置，如 Haldor-Topsoe 公司，Süd-Chemie 公司和 Technip-KTI 公司。

电机

电机在炼厂普遍使用，其电耗占炼厂总电耗的比重超过 80%。电机主要用于泵(占有使用电机的 60%)，空压机(占有使用电机的 15%)，风机(9%)和其它设备(16%)。下文讨论了提高电机、泵、压缩机和风机能效的机会，并详细描述了节能措施在炼制工艺过程中的应用和成功之处。

采用“系统法”来审视整个电机系统(泵，压缩机，电机和风机)，从而优化能源服务的供求，经常可以产生最大的节能效果。例如，对一个泵系统而言，系统分析法是对能源供应和需求两个方面进行分析，研究两方面因素之间的相互作用，是将着眼点从设备本身转向到整个系统的运行。下文所陈述的措施则描述了采用系统分析法的情况，其中包括：匹配速度和负荷(调速电机)、合理的系统规模，以及升级系统部件。总而言之，要想达到最佳的节能效果和系统性能，推荐使用系统分析法。下文中也对泵和压缩机进行详细论述。

电机功率。电机与泵的功率匹配不合理会引起不必要的能源损失。当峰荷降低时，电机的功率也应随之降低。削减容量过大的电机可以节电 1.2% (美国工业的平均值)，使用小型电机，将节约更多的能源。

高效电机。通过改进设计、选择更好的材料、更严格的容差以及提高生产工艺措施，高效电机可以减少能源损失。如果安装合理，高效电机就能够避免工作环境温度过高，从而提高了电机的开工率、轴承和绝缘材料的寿命、减少震颤。尽管有这些优点，但是美国只有不足 8%的工业企业在购买电机时，关注产品说明书有关效率的说明。

一般来说，用高效电机来替换需要更新的电机，经济上具有可行性，但是用高效电机来替换正在使用中的电机，就未必可行了(CADDET, 1994)。总体上来说，电机每年的故障率为 3%~12% (House 等, 2002)。根据铜业发展协会(CDA, 2000)的案例，有时用高效电机来替换正在使用的电机或许也具经济可行性。单个电机的投资回收期取决于电机功率、负荷因数以及运行时间。高负荷、长时间运转的电机节能效果最佳。一般来说，替换退役的电机，单从节能角度来讲，投资回收期不会超过一年(LBNL 等, 1998)。

为了提高能效，美国所有的电机必须符合国家电气业制造协会(NEMA)规定的标准要求。然而大多数电机制造商生产的电机已经大大超出了 NEMA 规定的标准要求(美国能源部—国际贸易局, 2001d)。NEMA 联合其它组织发起了“Motor Decisions Matter”运动,想以此来向业界推出 NEMA 认可的更高效电机(NEMA, 2001)。这样的高效电机甚至有更短的投资回收期。CDA 的数据表明,与那些达到“能源政策法案”规定的最低能效电机相比,50hp 的更高效电机的投资回收期不会超过 15 个月(CDA, 2001)。由于投资回收快,通常在选择电机时,不仅要选择高效电机,而且更应该选择现有的更高效电机(LBNL, 1998)。

同将电机重绕绕组相比,用高效电机替换原有的电机经常是一个较好的选择。目前,还没有关于电机重绕绕组方面的质量或能效标准。为了避免电机运行中出现的不确定因素,最好是购买一台新的高效电机替换原有电机,而非对电机进行重绕绕组。

功率因数。负载电感应负荷的设备,如变压器、电机以及 HID 照明在运行时会产生较低的功率因数。功率因数过低会导致电力消耗的增加。从而增加了用电成本。通过以下方法可以避免功率因数过低的问题:尽量减少闲置的电机、避免用电设备在超过额定电压下工作、用高效电机替换普通电机、在交流电路上加装电容器,以减少系统的功率损耗。

电压波动。电压波动降低了三相电机性能、缩短使用寿命。电压波动引起了电流波动,电流波动又会导致转矩脉动,使马达震颤加剧、机械应力增大、损耗增加,同时也会使电机过热导致使用寿命缩短。电压波动可能是由于电力调节设备误操作、不平衡变压器组或断路而引起的。电机终端的电压波动不应超过 1%。处于部分负荷下运行的电机,甚至即便是 1% 的电压波动也会降低电机的效率。如果波动上升到 2.5%,即便是满载运行,电机效率也会降低。对于一台功率为 100hp、年运行 8000 小时的电机而言,如果将电压波动从 2.5%纠正到 1%,那么每年可以节电 9500 kWh,或以电费 5 cts/kWh 计算,年节电费近 500 美元(美国能源部—国际贸易局, 2000b)。通过定期的监督电机终端的电压情况并采用年温度记录仪来监控电机的温度,可发现电压的波动。此外,必须确保单相负荷均匀分布,并加装故障指示器。另外一种电压波动指示器是 120 Hz 的波动仪。

调速器(ASDs)。在电机运行过程中,ASDs 能够使速度和负荷变化较好的匹配。许多离心设备系统,如泵、电机和压缩机,其能耗几乎和电流的立方成正比。

因此，电流的略微降低，与之相匹配的电机速度成比例的降低，有时可以大大的降低能耗。尽管，看起来对它们进行改造不太具有经济性，但在新系统或工厂中安装新的调速电机的投资回收期小于 1.1 年(Martin 等, 2000)。安装 ASDs 能够提高整体的生产率、控制和提高产品质量、降低设备磨损，从而减少未来维护成本。

可变电电压控制系统 (VVCs)。与能够满足不同的流率要求的 ASDs 相比，VVCs 可应用于可变负荷、恒速的系统。而供需的匹配原则和 ASDs 相同。

泵

炼油行业中，电机总电耗的 59% 左右用于驱动泵的运行(Xenergy, 1998)，相当于炼厂总电耗的 48%。这使得泵系统成为炼厂中最大的耗电设备。泵的使用遍布工厂的各个地方，是用来产生压力、输送液体。研究表明：通过改造设备或控制系统，可节约超过 20% 的泵系统所消耗的能源 (Xenergy, 1998)。

值得提醒注意的是，改造的初始成本只是泵系统的生命周期成本的一部分。对一个泵系统的生命周期成本而言，能源成本、运行成本以及维护成本更为重要。一般来说，一个生命周期为 20 年的泵系统，泵和电机的初始成本只占泵系统总成本的 2.5% (最佳实践项目, 1998)。根据泵的使用情况，能源成本可能占泵系统寿命期总成本的 95%。因此，在选择泵系统时，首先要考虑的是该系统的能源成本，而非初始成本。优化新的泵系统设计时，重点应该放在降低生命周期成本。Hodgson 和 Walters(2002)讨论了针对此问题开发的软件的情况，也探讨了一些相关案例。案例表明，完整的泵系统，其能源成本和生命周期成本都可大幅度的降低。一般情况下，这样的措施可节能 10%~17%。

泵系统包括泵、传动装置、管路和控制设备（如调速装置、节流阀），也是电机系统的一部分。上文已讨论了采用“系统法”来分析电机系统（泵、压缩机、电机和风机）。本部分将讨论泵系统。为了达到最佳节能效果和性能，这里推荐使用系统分析法，把泵、压缩机、电机和风机结合在一起进行分析。

除了减少使用外，有两种方法可以提高泵系统的效率。主要是降低动力泵系统（不适用于静态系统或“提升”系统）的摩擦力；调整泵系统，使其尽量靠近泵曲线的最佳能效点（BEP）(Hovstadius, 2002)。例如，合适的管径、表面镀层或

抛光，以及调速装置都可减小摩擦力、提高能效。为系统选择功率合适、高效的泵，可以使泵系统更加接近泵曲线上的最佳能效点。

运行和维护。长期的维护不良会降低泵系统的效率，使泵磨损加快，成本上升。良好的维护能够减少这些问题，并节约能源。正确的维护方法如下(Hydraulic Institute, 1994; LBNL 等, 1999):

- 更换磨损的叶轮，尤其是在腐蚀性介质或半固态介质中使用时。
- 轴承检测和维修。
- 更换轴承润滑油，一年一次或半年一次。
- 检查和更换密封材料，允许泄漏量通常为 2 滴/分钟~60 滴/分钟。
- 检查和替换机械密封，一般允许的泄漏量为 1 滴/分钟~4 滴/分钟。
- 磨损环和叶轮更换。当磨损环间隙加大或叶轮直径变小时，泵效率可能会降低 1~6 个百分点(Hydraulic Institute, 1994)。
- 泵/电机联合检查。

在美国，一般在运行和维护方面所能节约的能源估计占泵电耗的 2%~7%，投资回收期从极短的时间到一年不等(Xenergy, 1998; 美国能源部-国际贸易局, 2002d)。

监督系统。维护和运行措施同监督措施一并使用可以及时发现问题，并找出相应的解决方案，使系统更高效的运行。监督措施能够发现如下的运行事故：部件间出现接合间隙，出现障碍物、叶轮损坏、吸力不足、运行参数异常、泵体或管路发生阻塞和充气，以及泵磨损等。监控系统的功能包括：

- 磨损监控
- 震颤分析
- 压力和流量监控
- 电流或功率监控
- 泵的扬程变化及温度上升状况的监控（也称热力学监控）
- 配送系统的结垢或污染物堆积的监控

降低需求。液体存储器可用来均衡生产过程中使用的流体，可以提高能效，潜在的减少对泵能力的需求。此外，还应去掉旁通管路和其它不必要的管流。在这些措施中，每项措施都可节能高达 5%~10%(Easton Consultants, 1995)。采取降低过程静压、降低从吸液池到排液池的高程差、使用虹吸管减少静态高程变化、降低喷射口的流体出口速度等措施，可以降低泵的总扬程。

高效泵。在泵的使用寿命内，泵效率可能会降低 10%~25%(Easton Consultants, 1995)，而新泵的效率会提高 2%~5%。然而，业界的专家认为，问题并不一定是泵使用时间的长短而造成的，而是由于工艺过程发展了变化，造成泵和运行之间不匹配。用新泵替换原有的泵可以节能 2%~10%(Elliott, 1994)。采用更高效电机能够使泵系统的效率提高 2%~5% (Tutterow, 1999)

目前，很多泵都能满足扬程压力和流速能力的需求。泵的正确选择，不但能够节约运行成本，而且能够节约资金成本（采购另外的泵）。在固定的负载情况下，应选择那些在满足使用要求的速度最快的泵，这样不但选择了高效的泵，而且能使初始成本降到最低(*Hydraulic Institute and Europump*, 2001)。以下各种泵例外：泥浆处理泵、特种高速泵以及泵入口需要最小净吸入水流的泵。

合适的泵功率（使泵功率与给定的负载相匹配）。不合理的泵功率势必导致不必要的能量损失。当峰值负荷降低的时候，泵功率也应随之降低。美国产业界的研究表明，纠正功率过大的泵，估计平均可以节约泵系统的电耗 15%~25%(Easton Consultants, 1995)。此外，更换泵的配置和改进运行和管理可以降低泵的负荷。

如果泵功率过大，齿轮和传送带的速度降低，电机的运行速度也会降低。然而，实际过程中这种情况出现的较少。实施这样的措施的投资回收期小于 1 年。

美国加州 Chevron 炼厂发现其混送车间内的两台大马力次级泵，其功率过大。这两台泵与负载十分不匹配，在运行时需要配置节流阀。因此，这两台 400 hp 和 700 hp 的泵被两台 200hp 的泵所替换，同时在安装了调速器。这样，每年能耗降低了 430 万 kWh，节约开支 21.5 万美元 (CEC 和美国能源部-国际贸易局, 2001)。项目投资额为 30 万美元，投资回收期为 1.4 年。

Welches Point 泵站是一家中等规模的废水处理厂，位于美国康涅狄格州的 Milford，该厂参与了能源部实施的“电机挑战计划”。他们用一台功率较小的泵替换原系统中 3 台同样规格中的其中 1 台(Flygt, 2002)。他们发现这台小型泵能够有效的应对日常需求，而剩余的两台大型泵则以备高峰期时使用。处理同样体积的流体，小型泵需要更长的时间，这样工作节奏和压力都降低了，从而降低了因摩擦引起的能量损失，减少了磨损。用小泵取代原有的泵后，得到了预期效果，

节能 36096 kW，这相当于每年泵系统电耗的 20% 之多。如果该城的 36 个泵站都使用这样的系统，可节约 10 万美元。除了预期的节能量之外，系统磨损的减少则导致维护和停工事故相应减少，设备的寿命则延长了。使用小泵后，泵站的噪声也大大的降低。

多泵使用。使用多泵通常是解决负荷变化最成本有效性、最节能的方法，尤其是在静态的扬程系统中。美国产业界的研究表明，如果给负荷变化大的系统再安装上一个平行的泵系统，平均降耗可达到泵系统电耗的 10%~50% (Easton Consultants, 1995)。也可以考虑在动力系统中采用调速装置（见下）。平行泵是一种冗余设计，但同时可以提高系统的可靠性。芬兰造纸厂的案例研究表明，另外加装一台小泵，使这台小泵和已有的泵平行运行，把水从造纸机循环输送到两个蓄水池中，降低了大泵的负荷。在此案例中不考虑泵的启动。该系统估计每年节约 36500 美元（或 486 MWh, 58%），投资回收期为半年 (Hydraulic Institute and Europump, 2001)。

车削叶轮直径。如果运行流速产生较大的压差，可以削减叶轮直径，这样可以避免泵产生过大的扬程。在美国食品、造纸及石化企业，采用减小叶轮直径或降低齿轮齿数比的措施，节约电耗估计可达 75% (Xenergy, 1998)。

化工企业的案例研究表明，叶轮直径从 320 mm 削减到 280 mm 后，电耗降低了 25% (Hydraulic Institute and Europump, 2001)。年能源需求减少了 83 MWh (26%)。该项目的投资成本为 390 美元 (U.S.)，单从节能角度讲，投资回收期只有 23 天。除了节能外，该技术降低了维护成本、提高了系统稳定性、减少了空腔现象，消除了巨大的噪音和震颤。

另外一个案例是有关英国最大的食盐加工企业 (Salt Union Ltd)，该工厂把泵的叶轮直径从 320mm 削减到 280mm 后 (最佳实践项目, 1996)，用电量减少了 30%，即每年节电量 19.7 万 kWh，总计 8900 英镑。本项目的投资成本为 260 英镑，维护费用额外节约 3000 英镑，投资回收期只有 8 天 (单从节能角度讲，投资回收期为 11 天)。和上述的化工厂一样，该项目除了节能量和维护成本的节约外，还减少穴腔现象，消除了噪音和震颤。由于电耗大大降低，可以用 75kW 的电机来代替 110 kW 的电机，这就使得每年又可获得 16000 kWh 的节电量。

控制系统。对泵系统所采取的任何一种控制措施，都是为了关闭不用的泵，或者负荷要求低的时候，降低单个泵的负载。远程控制能够在需要时，更加迅速而又准确地开启或者关闭泵系统，同时减小劳动强度。2000年，美国加州的 Cisco 系统公司为喷泉水泵控制系统做了升级，以在高峰时段关闭这些泵(CEC 和 美国能源部-国际贸易局，2002)。无线控制系统能够在同一地点，同时控制所有的泵。这项工程每年节约了 3.2 万美元和 40 万 kWh 的电耗，相当于节约了喷泉水泵系统总能耗的 61.5%。项目总成本 2.9 万美元，简单投资回收期为 11 个月。除了节能外，还节约了维护费用，提高了泵系统的使用寿命。

调速装置 (ASDs)。调速装置可以更好的调整速度，使其能够和泵的负荷需求相匹配。同电机一样，泵的能耗近乎和流体流速的立方成正比⁶。因此，相对略微降低流速，使之与泵速成正比，可以节约很大的能源消耗。如果安装新设备，则可以缩短投资回收期。此外，安装调速装置能够提高整体生产率、控制产品质量以及降低设备磨损，从而降低未来维护成本。

同电机系统的负荷可调性一样，将调速原理运行到泵系统估计可节约 20%~50% 泵的电耗，并且具有相对较短的投资回收期，但这要取决于泵的使用情况、泵功率、泵负荷以及负荷变化(Xenergy, 1998; 最佳实践项目, 1996)。根据一般的经验估计，除非泵曲线非常平坦，否则，10%的流速调节就可节能 20%，20%的流速调节就可节能 40% (最佳实践项目, 1996)。

美国加州 Richmond 的 ChevronTexaco 炼油厂，在其 2250 马力的初级进料泵上安装调速装置，升级了该柴油加氢装置的进料泵，同时也改变了备用泵系统的运行程序。这样，每年节约了 70 万美元的成本，电耗每年降低了 12 GWh。泵系统的改造实施作为地方电力公司实施需求侧管理项目的组成部分。由于参与了本项目，炼厂根本不需要投入任何投资成本(美国能源部-国际贸易局，1999)。

Hodgson 和 Walters (2002)探讨了在建造新的泵系统时，可以用调速装置来替换原有的节流阀。在采用专业软件优化设计时，得出的建议是要在系统中安装

⁶这个公式仅适用于动力系统。如果系统仅包括了升程（静态扬程系统），安装调速装置不能带来任何的效益（实际情况往往是会造成更低的效率），因为静压系统的流速不受外界控制，因此 ASD 系统不适用于静态扬程系统。同样，一个系统的静态扬程越多，ASD 的作用越弱，获得的效益要比大型动力系统要低的多。如果有这样的情况发生，需进行详细的计算确定调速装置的实际效果。

调速装置。这样，在系统的生命周期内，能源成本会低于 71%，系统的生命周期总成本会降低 54%。

避免使用节流阀。应尽量避免使用节流阀。大量使用节流阀或旁通管路，可能意味着泵系统的功率过大(Tutterow 等，2000)。与节流阀相比，调速器或在开/关调节系统更加节能 (Hovstadius, 2002)。

Flying J 炼油厂位于美国犹他州盐湖城，日产量为 2.5 万桶。对该厂的审计揭示了安装在两台 200 马力进料泵上的节流阀造成的能源损失情况。如果将节流阀的能耗损失降到最低，潜在的节能成本为 3.9 万美元 (Brueske 等，2002)。把 250 马力泵在不需要时关闭，同时使节流阀能量损失降到最低程度，这样每年又可再节约 2.8 万美元。

适当的管径。同泵的情况类似，管径尺寸太小也能够造成不必要的能源损失。管径的选取要依据整套设备的经济性、流体的最低流速、要求的最小内径、能够使管路及配套部件的腐蚀达到最低的最大流体流速，以及工厂管径标准。增加管径固然可以节约能源，但也必须和泵系统组份的成本相平衡。Easton 咨询公司(1995)和其它一些纸浆及造纸业界的公司为美国的产业界作出估计(Xenergy, 1998)：平均来说，改造管径可降低 5%~20%的能耗。在设计或者系统改造阶段就应该确定合适的管径。因为在设备更新阶段，成本没有一定的限制。

更换传送带。用直接耦合传动方式替代 V 形带的传动方式，可达到节能的目的(Xenergy, 1998)。美国用这种方法平均大约可节能 1%(Xenergy, 1998)。

精密铸造、表面镀膜及抛光。利用表面镀层或抛光能够降低表面粗糙度，反过来，也能够降低能耗。同时随着时间的推移，有助于长期保持能效不会下降。这种措施在一些较小的泵上更有效。就钢铁产业中的一个案例来说，对（轧机）冷却泵（350 kW）的表面进行镀层处理，大约需要额外投资 1200 美元，投资回收期 5 个月，年节能 2700 美元（相当于节能 36 MWh，节能 2%）(Hydraulic Institute and Europump, 2001)。对泵进行表面镀层处理比不进行表面处理，大约可以节能 2%~3%（最佳实践项目，1998）。

密封。大概 70% 的泵故障是由密封失效而引起的(*Hydraulic Institute and Europump, 2001*)。泵的密封圈的位置直接影响电力的消耗, 通常用阻气密封、平衡密封以及非接触迷宫式密封的方式来优化泵效率。

减小间隙, 防止渗漏。沿着叶轮和泵外壳之间的间隙, 每处的压力是不同的, 因此造成了内部滴漏损失。间隙越大, 内部滴漏越大, 导致了能效的下降。新泵的正常间隙为 0.35 mm~1.0 mm (*Hydraulic Institute and Europump, 2001*)。随着间隙的增大, 渗漏几乎也成线性增大。例如, 对于封闭式叶轮来说, 5mm 的间隙能够降低泵 7%~15% 的效率, 但是对于半封闭式叶轮来说, 效率能降低 10%~22%。具有磨损性的液体和泥浆, 甚至是雨水都会影响泵的效率。使用较硬的结构材料(比如不锈钢)能够降低磨损率。

干式真空泵。干式真空泵于 80 年代中期引进日本用于半导体产业, 80 年代后期被美国引进用于化学工业。干式真空泵的优点是能效高, 可靠性良好, 而且可以减少对大气和水的污染。干式真空泵有望将来能够替换油封泵(*Ryans and Bays, 2001*)。如果使用部门比较重视污染物排放的问题, 那么干式真空泵的优势才能体现出来。然而, 由于干式真空泵的投资成本较高, 除非在某些对污染物及污染控制要求较为严格的地方, 干式真空泵才能够得以推广, 否则石油炼制行业大规模引进的可能性不大。

压缩机和空气压缩

压缩机的能耗占炼厂总电耗的 12%。炼厂中的主要能源消耗来自于那些为燃烧炉提供压缩空气和气流的压缩机。大型压缩机可以由电动机、蒸汽轮机或燃气轮机来驱动。炼厂压缩机用来压缩空气的能耗只占压缩机总能耗的一小部分。在企业中, 压缩空气可能是一种最昂贵的能源形式, 因为它的使用效率非常低。一般来说, 压缩空气系统的效率自始至终大约只有 10% (*LBNL 等, 1998*)。此外, 每年压缩空气系统运行的能源成本要比其初始成本高。由于这种低效率和过高的运行成本, 压缩空气的使用受到了限制。如果需要使用压缩空气, 那么在不断监控和重新权衡其替代物的状况下, 也只能是在最短的时间内生产出最少量的压缩空气。由于炼厂使用有限的压缩空气(但仍是能效低下的源泉), 因此本文主要是有关其它行业的减少压缩空气系统能耗的措施。有很多措施可以减少压缩空气系统的能耗, 其成本并不高; 一些措施的投资回收期也相当短, 不到 1 年。

压缩空气——维护。对压缩机的不良维护会降低压缩效率，增加空气渗漏，增加压力不均，还将导致运行温度升高，湿度控制不良以及产生过多的污染物。良好的维护能够减少这些问题和节约能源。合理的维护措施包括以下几方面（LBNL 等,1998，除非另外注明）：

- 管线过滤器阻塞会提高压降。通过检测和定期清洗过滤器，保持压缩机和中间冷却表面的清洁和无淤塞。选用压降仅为 1psi 的过滤器。清洗过滤器的投资回收期一般低于两年（*Ingersoll-Rand*, 2001）。安装过滤器不当会使污染物不能进入收集设备，从而导致这些过滤器永久损坏。当压降一般超过 2~3psi 时，要更换过滤颗粒和润滑剂清除部件。每年对各个部件检查至少一次。同时应考虑增加并行过滤器，以降低空气流速，从而减少压降。要想使压缩系统每年的能耗降低 2%，则应更加频繁的更换过滤器（*Radgen and Blaustein*, 2001）。但是有一点必须注意，当使用聚结过滤器时，能效将降低到小于 30% 的设计流速。
- 除了电机冷却不良会增加能耗以外，也会导致电机温度升高，线圈电阻增大，降低电机使用寿命。要保持电机和压缩机清洁，并且其润滑效果良好。应每隔 1000 小时，对压缩机润滑剂进行取样分析，确保其能够正常使用。除了节能外，这项措施还有助于避免设备腐蚀和系统性能降低。
- 在满负荷运行时，定期检查风机和水泵。
- 定期检查排水阀，确保其无论打开还是关闭均未被堵塞，并且保持清洁状态。一些用户把凝汽阀打到半开状态，这样可以一直不间断的排水。这种方式浪费了大量的能源，是绝对不可取的方法。相反，应该安装简单的压力驱动阀。应清洗和维修失灵的阀门，而不是让它一直处于打开的状态。自动排水系统并不浪费空气，只有当冷凝水排出时，系统才会开启。根据设备供应商的说法，一般情况下，维护和检修的投资回收期不超过 2 年（*Ingersoll-Rand*, 2001）。
- 维护压缩机的冷却器，使干燥器的入口温度达到最低（*Ingersoll-Rand*, 2001）。
- 检查传送带磨损情况，并及时调整。较好的方法是，每运行 400 小时调整一次。
- 检查水冷系统的水质（pH 值及不溶物总量）、流速和水温。按照制造商提供的说明书，清洗和替换过滤器及热交换器。
- 尽量减少泄漏（详见下文减少泄漏部分）。
- 当机器出现故障时，需使用专门的调控器关闭设备。
- 使用压缩空气的设备需进行过压量、耐压时间或耐压体积的检验。这些设备必须经过调压才能使用，调压可由生产部门来完成，也可通过设备的自身配置压力调节器来调节。质量不佳的调压器会产生漂移，并有可能使空气损失

加大。另外，未经调压的设备，长期处于系统最大压力下运转，会浪费更多的能源。系统运行压力过高不仅缩短设备寿命，也会增加维护成本。

监控措施。适当的监控和维护压缩空气系统能够节约大量的能源和资金。适当的监控手段包括以下内容(CADDET, 1997):

- 在每个接收器或主线路上安装压力表，在干燥器和过滤器上安装不同的仪器等。
- 在压缩机及其水冷系统上安装温度监测器，检测污垢或阻塞物。
- 用于测量空气质量的流量计。
- 用于检测空气干燥效果的露点温度检测仪。
- 在压缩机传动系统上安装电表及计时器。
- 设备经改装后，应重新检查其压缩空气分布系统，以确保空气不会流入系统的未用设备或废弃部分。
- 检查系统中任何一种阻滞流动的因素，比如障碍物或粗糙度。这些因素使得系统压力必须大于实际需要的压力。由于阻滞流动而使系统压力的升高，会增大压缩机的动力消耗，系统压力每升高 2psi，动力消耗升高 1% (LBNL 等, 1998; *Ingersoll-Rand*, 2001)。最大的压降往往出现在使用端上，其中包括：过细或漏气的软管、管道、设备隔断部件、过滤器、调节器、阀门、喷嘴、加油口（需求侧）以及空气/润滑剂分离器、二次冷却器、去湿器、干燥器和过滤器。

减少泄漏（管路和设备）。泄漏是能源浪费的一种重要方式。在一个典型的维护不善的工厂里，泄漏量可以占压缩空气总产量的 20%~50% (*Ingersoll Rand*, 2001)。经过对泄漏维修或维护，有时可以降到 10% 以下。总而言之，泄漏经维修后，预计可以降低压缩空气系统 20% 的能耗。

泄漏量随着管线或设备上孔洞大小的不同而不同。一台在 6bar (87psi) 的工作压力下，每年运行 2500 小时，泄漏孔洞直径为 1/2mm 的压缩机，估计每年可损失电 250 kWh；1mm 时每年可损失 1100 kWh；2 mm 时每年可损失 4500 kWh；4 mm 时每年可损失 11250 kWh (CADDET, 1997)。

除了增加能耗以外，泄漏还会导致充气系统或设备的运行效率降低。反过来，又会影响生产，缩短设备使用寿命。同时还会额外增加对设备的维护，造成不定时的停工。泄漏引起了压缩机能源和维护成本的增加。泄漏一般发生在设备的接

合处、软管、管道、附属配件、调压器、冷凝水的开关阀、管道连接处、部件分隔处以及螺纹密封处的部位。快速连接配件始终是泄漏的多发点，要注意尽量避免。一种简单的检漏方法是用肥皂泡涂抹到可疑处。检漏最好的方法是使用超声波检漏，可以检测发出高频啾啾声的空气泄漏。找到泄漏部位后，应该把泄漏部位标记出来，然后进行维修并重新检验。

美国加州 Vernon 的 Mobil 公司对 Mobil 配送设备的压缩空气系统进行了改造，用一台 50 马力的新压缩机替换原有的压缩机，并修复了系统的漏气部位。每年节能量达 2.07 万美元，而相应投资则为 2.3 万美元，投资回收期仅仅一年多(美国能源部-国际贸易局，2003b)。

减小入口空气温度。减小入口空气温度能够降低压缩机的能耗。许多工厂通过从建筑物外部吸收空气，来降低压缩机入口空气的温度。这种方法的投资回收期的长短取决于压缩机空气入口的位置(CADDET, 1997)，长的可达 5 年左右。一般情况下，压缩空气入口温度每降低 3°C 其能耗将降低 1% (CADDET, 1997; Parekh, 2000)。

最大许可压力露点。应该选择效率最高，并且在允许压力条件下空气露点能够达到最大值的干燥器。一般情况下，用于去湿的干燥器所消耗的能源占压缩机能源消耗的 7%~14%。然而，用于制冷的干燥器所消耗的能源占压缩机能耗的 1%~2% (Ingersoll Rand, 2001)。可以考虑使用具有浮动露点的干燥器。值得注意的是当用气设备处于严寒环境时，制冷干燥器不可用。

控制系统。总的空气需求量为所有用气设备平均耗气量的总和，而非单个设备的最大值总和。任何一种控制措施的目的都是要关闭不用的压缩机或推迟使用另外的压缩机（直到必须使用时）。除了需要减量运行的压缩机外，所有开启的压缩机都应该满负荷的运转。控制回路的布置也非常重要，减小或控制初级受气系统的压力能够减少能耗 10%，甚至会更多 (LBNL 等, 1998)。根据 Radgen and Blaustein (2001) 的报告，尖端控制系统每年可节能 12%。压缩机控制系统包括了开启/停止控制、加载/卸载控制、节流控制、多步控制、调速控制、网络控制等。

开启/停止控制（开关）是最简单的控制系统，可应用于小型往复式压缩机或旋转螺旋压缩机。开启/停止控制要根据设备的减压情况，电机驱动的压缩机开启或闭合。该控制系统适用于载荷循环程度非常低的设备。如果较频繁，则会使电机过热。开启/停止控制系统的投资回收期一般为 1~2 年(CADDET, 1997)。

加载/卸载控制系统或恒速控制系统允许电机连续运转，但是当减压到一定程度时才可卸载压缩机。大多数情况下，完全卸载旋转螺旋压缩机仍然消耗了 15%~35%的满载时的功率，但不会作有用功 (LBNL 等, 1998)。因此，采用加载/卸载控制系统可能会更加低效，除非需气量达到一定的规模。

通过关闭进气阀或限制压缩机的进气量，调节或节流控制系统可以调整压缩机的产气量，满足不同气流量的要求。节流控制系统可用于离心压缩机或旋转螺旋压缩机。改变压缩机控制系统为可调速的控制系统，每年可节能达 8% (CADDET, 1997)。多步或部分加载控制系统可以在两个或更多压缩机同时加载的情况下运行。在没有压缩机开启/停止控制系统或加载/卸载控制系统的情况下，该系统可以实现对出口压力进行进一步控制。

适当规格的流量调节器。在压缩空气系统中，有时气流量的调节能够对节能起到很大的作用。选择适当的流量调节器，可以减少压缩空气的消耗，否则就会产生过剩的压缩空气。同时建议，当设备发生故障时需用专门调控器关闭设备。

适当的管径。管径的不合适会引起压力损失，增加泄漏，增大产气成本。为优化性能，必须选择适当的管径，或者为了满足当前压缩机系统的需要重新调整管径。一般情况下，提高管径每年可以节能 3% (Radgen and Blaustein, 2001)。

水预热系统的热量回收。一台工业空压机所消耗 80%~93%的电能都被转换成热能。在大多数情况下，一台热量回收设备可回收 50%~90%的热量，以用于采暖，工艺过程加热，水加热，空气预热，锅炉进水余热，工业干燥，工艺清洗过程，热泵，洗涤以及燃油嘴吸气的预热 (Parekh, 2000)。一般投资回收期不超过一年。对于大型水冷压缩机，回收效率达到 50%~60% (LBNL 等, 1998)。通过这项措施的实施，每年回收用于采暖的热量占空气压缩系统能耗的 20% (Radgen and Blaustein, 2001)。

调速装置 (ASDs)。在回转式压缩机上安装调速装置，每年可以为空压系统节能 15% (Radgen and Blaustein, 2001)。在压缩机上安装调速装置的收益率很大程度上取决于压缩机负荷的变化情况。当负荷和/或环境温度变化剧烈时，压缩机负载和效率也会产生很大的波动。调速装置对那些电价较高的地区 (> 4 cts/kWh) 来说，其投资回收期无疑极具吸引力 (Heijker 等, 2000)。

高效电机。在空压系统中安装高效电机，每年可降低能耗 2%，投资回收期小于 3 年(Radgen and Blaustein, 2001)。对于空压系统而言，此措施应用于运行功率不超过 10kW 的小型设备，可获得最大的节能量(Radgen and Blaustein, 2001)。

风机

风扇可用于锅炉、反应炉、冷却塔以及其它设备上。和其它动力设备一样，有很多措施可以提高风机系统的性能和效率。风机系统的能效在很大的程度上依据叶轮种类的不同而不同(Xenergy, 1998)。然而，成本有效性的措施主要取决于系统各自的特点。

风机功率过大。大多数风机为适应某种设备都使用了过大的功率，导致了能效损失 1%~5% (Xenergy, 1998)。然而，通常情况下，采取用调速装置控制风机的速度（见下文）比更换风机系统更具成本有效性。

调速装置 (ASD)。在风机上安装调速装置可大大节省能源。利用调速装置来改造风机系统后，节能可达 14%~49% (Xenergy, 1998)。

对美国加州 Paramount 地区 Paramount 石油公司的沥青炼厂进行审计后找到了节能的机会：在水冷塔（40 马力到 125 马力）的 6 个电机上安装调速装置。这些电机目前为手动控制，到了冬季，电机功率又设计的过大。如果在所有六个电机上都安装调速装置，保持设定的冷水温度，那么每年可以节电 120 万 kWh (美国能源部-国际贸易局, 2003a)。由于电机功率的缘故，投资回收期相对较长，大约 5.8 年。每年节约成本约 4.6 万美元。

高效传送带（齿形）。在许多工厂里，传送带在风机系统中使用的种类庞杂，但这是重要的一部分。估计大概有一半的风机系统使用的是标准的 V 形传送带，大约有三分之二可以用高效的齿形传送带来替代(Xenergy, 1998)。齿形传送带替代标准 V 形传送带即可节能，又可节约资金。齿形传送带的运行温度低，使用时间长，维护次数少，其能效比标准 V 形传送带要高约 2%。投资回收期一般从不足一年到三年不等。

照明设备

照明及其它耗电设施的耗电量不足整个炼厂的 3%。然而进一步节能潜力依然存在，而且有可能对整体能源管理战略有所贡献。由于照明和其它设施的重要性相对较小，节能指南主要侧重在一些可实施的，最重要的措施上。有关照明节能指南和实施方法的额外信息可以参见北美照明工程协会（*Illuminating Engineering Society of North America* (www.iesna.org)）的资料，也可以参见加州能源委员会（*California Energy Commission*）的资料(CEC, 2003)。

照明控制系统。在非工作时间，照明灯可以通过自动控制系统自动关闭。比如人体感应传感器，当无人时灯会自动关闭。在一些较小区域，自动控制和手动控制同时使用以节省更多的能源。

T-8 直管荧光灯或金属卤化物灯替代 T-12 直管荧光灯。T-12 是指管径为 1/8 英寸的 12 倍（即管径为 12/8 英寸或 3.8 cm）的荧光灯。T-12 的初始输出功率较高，但能耗也较高。T-12 直管荧光灯的效率低，灯寿命短，易光衰，显色指数低。维护和能源成本也都很高。用 T-8 直管荧光灯替代 T-12 后，能效可近乎提高一倍。但是必须注意的是，对系统进行更新时，操作的每一步都应争取同灯具供应商以及制造商进行合作。市场上有大量的 T-8 直管荧光灯和镇流器，对于每个系统来说，二者之间必须做到合理搭配。

北美福特油漆公司的 21 个油漆销售店中，有 11 个对照明系统进行了更新改造。照明成本降低了 50%多(DEC, 2001)。灯的初始亮度较低，但由于光衰较低，所以实际亮度并不低。新灯的使用寿命是以前的 2~3 倍。年节能量为 1750 万 kWh，年节约运行成本 50 万美元。美国加州 Santa Monica 的 Gillette 设备制造公司用 496 盏金属卤化物灯替换了原来的 4300 盏 T-12 直管荧光灯，同时用 10 只日光控制开关替换了原来的手动控制开关。这项措施的实施带来了每年减少 58%的电耗，节约资金 128608 美元。总成本为 176534 美元，投资回收期低于 1.5 年。

用高压钠灯或金属卤化物灯替换汞灯。在一些显色要求较高的工业部门，与汞灯或荧光灯相比，金属卤化物灯可节能 50%(Price and Ross, 1989)。在显色要求不高的部门，与汞灯相比，高压钠灯可节能 50%~60%(Price and Ross, 1989)。

高压钠灯和金属卤化物灯发热较低，可以降低 HVAC 负荷。除了节能外，金属卤化物灯可以带来更好的光照和更好的光通量以及提高显色指数和降低运行成本(GM, 2001)。

用高强度荧光灯替代金卤高压气体放电灯。可用高强度荧光灯来替代传统的高压气体放电灯（HID）。新的系统把高效荧光灯、电子镇流器以及高效灯具整合起来，能使工作场所的输出功率最大化。新系统的优点有很多：低能耗、灯的整个寿命期内光衰较低，较好的调光性，启动快，重启迅速，显色好和较高的初始透光率和低眩光(Martin 等, 2000)。高强度荧光灯系统比金卤 HID 灯节能 50%。原本在金卤 HID 上不可能实现光的调控，在新系统中得以实现，从而节约了大量的能源。更新改造系统时，包括安装费在内每套灯具需花费约 185 美元(Martin 等, 2000)。除了节能和较好的照明质量外，高强度荧光灯还有助于提高生产率，降低维护成本。

用电子镇流器替换电磁镇流器。镇流器是一种机械装置，可以调节照明设备启动时所需的电量，并可使光的输出量保持稳定。电子镇流器比电磁镇流器节电约 12%~25%(EPA, 2001)。电子镇流器也具有调光性 (Eley 等, 1993)。如果电子镇流器同自动日光传感器，人体感应传感器以及手动调光器一并使用，则节能可超过 65%(Turjel 等, 1995)。

反射罩。反射罩是一种经过高抛光的像镜子一样的部件。它能够向下反射光线，从而减少灯具的光散射。反射罩能够有效地降低灯具所需电压。

发光二极管(LEDs) 或 镭射光。有一个简单的降低能源成本的办法，直接把用作出口标志灯的白炽灯替换成发光二极管或镭射灯。LED 的能耗比传统的出口标志灯能耗要低 90%(Anaheim Public Utilities, 2001)。1998 年的照明研究中心的调查显示，大约 80%的出口标志灯为 LEDs(LRC, 2001)。除了用于出口标志灯，LEDs 越来越多的被用于道路标识和紧急通道。LED 具有寿命期长、使用过程中发热低的性能，因此可以把 LED 镶嵌在塑料材料里便于使用。镭射灯根本不消耗任何电能，有着和 LEDs 类似的用途。

北盐湖城地区的 Flying J 炼油厂用新的 LED 标志灯替换掉了原来的出口标志灯，这使得每年节能 1200 美元。

系统的改进。结合上述的各种措施，照明系统的改进成为最有效的、最具综合性的节能途径。高频镇流器和反射罩可以同效率低于 50% 的高频荧光灯管一并使用，这样就能产生出 90% 的光，但能耗却比以前降低了 50%~60% (*Price and Ross, 1989*)。密歇根州的一座办公大楼在照明系统的改造中使用高效荧光灯镇流器替换了原有的低效镇流器，改装后照明负载降低了 50%，整个大楼的电力负载则降低了将近 10% (*Price and Ross, 1989*)。同样的，另一家设备制造商用金属卤化物灯替换掉了原来的荧光灯，也取得了较好的效果。通常这些系统改进措施不但能够提高照明质量，还能降低能耗。

降低系统电压也是一种节能途径。一家美国汽车制造商安装了可降压使用的 HID 后，照明电耗降低了 30%。Electric City 是一家节能设备供应商，他们把设备和中心控制开关（可由计算机控制）连接起来，通过限制流经灯具的电流降低了工作电压，从而达到节能的目的，相比之下光强只是降低了一点点。布里斯托尔市的工业园发明了另外一种已获得专利的照明电压控制器——Wattman。这种控制器和 HID 和荧光灯照明系统配合使用，能得到类似的节能效果 (*Bristol Park Industries, 2002*)。

发电

大多数炼厂都具有各种形式的自备发电站。实际上，炼厂是一个优良的高效发电场所，可以采用热电联产的方式（CHP）。热电联产完全可以利用工厂内部产生的燃料来发电，从而使得炼厂对电网的依赖性减弱，甚至炼厂还可以向电网送电。这不但提高了供电的稳定性，而且还具有明显的成本有效性。向电网送电的效益取决于炼厂所在州的法规政策。并非所有的州都允许电能的转让（例如，使用电网直接把电能卖给另一个客户）。同时有关向电网运行商销售的电价结构的法规，州与州之间也是不同的。

热电联产(CHP)。在美国炼厂中使用的蒸汽大约只有 10% 用于热电联产机组。炼油行业最具有发展热电联产的潜力。实际上一个高效的炼油厂可以净输出电力。随着当前新发明技术在一些炼油企业（下文讨论）的商业化运用，炼厂输出电力的潜力正在进一步加大。传统的热电联产机组的潜力估计还有 6700 MWe (*Onsite, 2000*)，其中大部分的潜力存在于中型和大型燃气机组中。

在有利用工艺过程热、蒸汽、冷却以及电力的地方，热电联产电厂的效率要比标准的发电厂更高。这是因为热电联产可利用余热发电，而常规发电厂则不可能。此外，当热电联产系统位于炼厂内部或者靠近炼厂时，电力传输的损失也可降到了最低。可以由第三方的公司来开发热电联产电厂，而炼厂则作为电力用户。这样就免去了与建设热电联产工程相关的的资本支出。虽然系统是由第三方的公司运营并拥有，但炼厂却得到了（或者是部分得到了）这样的好处，即更高效的热电供应系统。实际上，建于炼油厂内的热电联产设施，其中大约 60%是由第三方公司来运营的(Onsite, 2000)。例如，2001 年位于印第安纳州的 BP 公司 Whiting 炼油厂新安装了一套 525 MW 的热电联产机组，总投资为 2.5 亿美元。投资完全由 Primary 能源公司来承担。许多新的热电联产项目都可以运用这样的融资方法。其它途径包括：由炼厂和发电企业或运营商共同建立合资公司，建设热电联产设施。

对热电联产机组和锅炉的运行方式进行优化是获得额外节能量的另外一个领域。为满足蒸汽和电能的需求，希腊 Hellenic Aspropyrgos 炼油厂实施了输送调配的优化项目，该项目在节约能源和成本方面显示出了巨大的潜力 (Frangopoluos 等，1996)。

对于需要冷却的系统，可以同热电联产机组相结合，以利用其余热发电，这样既可发电又可进行冷却。一般情况下，炼厂的制冷和冷却系统占总电耗的 5%~6%。通过冷却系统与余热发电结合来节能已在建筑物和一些具有制冷设备的场所使用，但本文作者目前还不了解该技术在炼厂的应用状况。

对那些热需求量大而又变化多的场所而言，新型的气轮机技术无疑使得热电联产更具有吸引力。喷汽式气轮机 (STIG or Cheng cycle) 能够吸收过量的蒸汽，比如由于对热需求量具有季节性变化，可以向气轮机内注入蒸汽来提高发电量。STIG 最初的发电功率只有 5 MWc，目前已达到了 125 MW。全世界已经有 50 多个地方安装了 STIG，尤其在日本、欧洲和美国，广泛应用于各行业和各种用途。节能效果和投资回收期取决于当地的实际状况（如能源结构，电力销售以及工况条件）。在美国，STIG 设备是由国际电力系统公司 (San Jose, California) 销售的。澳大利亚的 OMV 石油公司已在考虑使用 STIG 以升级现有的热电联产系统。本文作者目前还不了解关于 STIG 在炼油企业的商业应用状况。

蒸汽轮机在炼厂中经常是作为热电联产机组的一部分，或作为独立发电系统。蒸汽轮机的效率取决于入口蒸汽压力和温度，以及出口压力。每一台蒸汽轮机都依据特定的蒸汽入口温度和压力而设计。操作者应该确保蒸汽的入口温度和压力相匹配。入口蒸汽温度降低 7.8°C，将会使气轮机的效率降低 1.1% (Patel and Nath, 2000)。与此类似，冷凝涡轮的真空排气程度太高，或背压式汽轮机的出口压力太大，都将导致效率损失。

1990 年，美国得克萨斯州的 Valero's Houston 炼油厂建设了一座 34 MW 的热电联产机组，采用了两台气轮机和两台回收余热产蒸汽的设备（锅炉）。此系统提供了炼厂所需的所有电能，有时还能向外网输电。热电联产系统已经产生了日节能 5.5 万美元的效益(Valero, 2003)。即便是小型炼厂热电联产也具有很大的吸引力。位于美国加州的 Paramount 石油公司下属的 Paramount 沥青炼厂经审计确认了安装热电联产机组的节能机会，并确认了热电联产措施可为这家小炼厂带来最大的节能量。一套 6.5MW 气轮机的热电联产机组每年节能 380 万美元，投资回收期 2.5 年(美国能源部-国际贸易局, 2003a)。此外，热电联产发电机组还可以降低炼厂中断电力供应的风险。采用可获得的效果最佳的控制排放技术的成本作为项目投资成本，该套装置建于 2002 年。

气体膨胀式涡轮机。天然气经常是在高压状态下输送到炼厂。气体在高压下传输时压力可达 200~1500 psi。当气体从高压管道输送到发电机组时要进行减压，从而产生压降。膨胀涡轮就是利用压降或过程热来发电。膨胀涡轮包括膨胀装置和发电装置。在膨胀涡轮内，高压气体膨胀做功。能量从压力气体中释放出来，同时气压和气体温度降低。化工厂利用涡轮机来液化气体已有几十年了。膨胀涡轮用作能量回收始于 20 世纪 80 年代初期(SDI, 1982)。自从 80 年代以来，这项技术已经做了很多改进，已具备了良好的技术可靠性。一台简单的膨胀式涡轮机是由一个叶轮（膨胀轮），一个传动杆和一个回转轴组件构成，并同发电机相连接。膨胀式涡轮机一般与天然气输送管线的调压器平行安装。如果气体流量太小，就不能有效的发电，或者膨胀式涡轮机出现故障，压力就会以常用的方式降低。膨胀循环的压降会引起气体温度的下降。虽然涡轮机的设计能经得起低温，但是多数阀门和管线规格都不能适于温度低于-15°C 的情况。此外，就像重质烃中发生的气体凝析一样，温度降低时，气体湿度将变大。这就需要在膨胀前后给气体加热。这种加热过程既可利用热电联产机组，也可利用附近的余热源。炼油企业经常产生过剩的低温余热，使得炼厂成为利用涡轮机发电的理想场所。欧洲和日本的工厂和电力公司都已经安装了膨胀式涡轮机组。

1994年，位于荷兰 IJmuiden 的 Corus 联合钢铁厂安装了一套 2 MW 的涡轮机发电机组。钢厂接收到的气体压力为 930psi，气体经预热后在涡轮机里膨胀，然后压力变为 120 psi。涡轮机上的最大气体流量每小时为 40000m³。然而，由于平均容量只达到了 65%，使得平均流量每小时只有 25000m³。涡轮机使用来自于热轧带车间的 70°C 冷却水预热气体 (Lehman and Worrell, 2001)。1994年，这台 2MW 的涡轮发电机组大约发电 11000MWh，其中带钢车间提供了发电 12500MWh 的余热。因此，传递给高压气体的最大热量中大约有 88% 输出为电能。安装这套装置的总成本为 260 万美元，运行和维护成本为每年 11 万美元。这样，每年的总成本为 11 万美元，而每年发电收入为 71 万美元（1994年，荷兰的电价为 6.5 分/度），投资回收期为 4.4 年。

蒸汽膨胀式涡轮机。蒸汽是高压下产生的，但通常会把蒸汽压力降下来，以便其他的不同工艺过程可以使用。举例来说，蒸汽首先在 120 psig~150psig 压力下生成，然后通过管网输送到工厂的各个工序。根据不同的工艺过程，压力下降到 10 psig~15 psig。一旦其中的热能被吸收，冷凝水通常被返回到产汽厂。一般来说，随着蒸汽通过降压阀（PRV），其气压也随着降低。阀门不能回收压降过程中释放出的能量。其实这些能量可以通过小型背压蒸汽涡轮机得以回收。有些工厂专门生产这种设备，如 Turbosteam 公司（以前属于 Trigen 公司）和 Dresser-Rand 公司等。

蒸汽膨胀涡轮机的应用潜力取决于炼厂和炼厂中蒸汽系统的特点。这项技术已经在学校、纸浆及造纸、食品和木材加工行业中商业化应用。然而炼油企业还没有应用。蒸汽膨胀涡轮机的投资一般估计为 600 美元/kWe，运行和维护成本为 0.011 美元/kWh。

高温热电联产。可以预先把涡轮机同原油蒸馏装置相连接（或与其它温度适宜、连续运转的装置连接）。如果气轮机的出口气体温度足够高，气轮机的废气就能够用来给蒸馏炉供热。

有一种称作“repowering”的废气利用方式，使用该方法时，炉体不作改造，但要用燃气轮机来代替助燃风机。废气中仍含有大量的氧气，这些氧气可用作蒸馏炉的助燃气体。气轮机废气提供的热量占蒸馏炉耗热的 20% 之多。荷兰

某炼厂安装了两台这样的装置（总功率为 35 MW）(Worrell 等, 1997)。一家位于西海岸的炼油厂在其重整反应器上安装了一台 16 MW 的气轮机(Terrible 等, 1999)，这台气轮机产生的烟道气又供重整反应器的输送段使用，从而增加蒸汽量。这些蒸汽可供一台 20 MW 的蒸汽轮发电机使用。

另外一种利用方式称为“高温热电联产”，不仅具有较大的热电联产潜力，而且具有节能效益明显的特点。热电联产厂产生的烟道气可以预热进炉料或预热燃气。采用这种方法需要更换原来的炉子，这是因为气轮机排出的烟道气温度较低，其辐射传热的能力也远低于燃气(Worrell 等, 1997)。所以两种不同的利用方式就产生了差别。第一种方式气轮机释放的热量被余热回收炉回收，用来加热过程进料。第二种方式先把废气通入到“导热油加热器”中加热导热油。然后通过热交换方式，导热油再加热工艺进料。为提高整体能效，两个系统中排放出的气体经加热工艺进料后，余热应用于其它低温过程。相比之下，第二种方式更可靠，因为其导热油缓冲器是内置式的。二者的主要区别在于第一种方式工艺进料由废气直接加热，而第二种方式则以导热油为介质进行加热，更加灵活。位于丹麦弗雷得里克的壳牌公司的一家炼油厂安装了第一种类型的装置。低温余热被用于集中供热。对此的研发旨在为具体的联产作出详细的设计研究，优化其蒸馏炉，以便将更多的示范性项目投入实施。

气化。对炼厂的渣油和塔底重馏分进行的气化处理，使得热电联产更有用武之地(Marano, 2003)。由于对轻油产品的需求日益增加，重油的转化的日益增加，因此，炼厂不得不想办法处理日益增多的渣油和塔底重馏分。气化重馏分和焦化产生的合成气可以有效的消耗掉这些副产品。最新的气化工艺可以使副产品中的重组分和氧气相结合在高温条件下，在夹带床气化炉内发生气化反应。由于氧气的供给量有限，重组分会被气化成一氧化碳和氢气的混合物。以 H_2S 形式存在的硫很容易脱除掉，变成单质硫。合成气可用作化工过程的原料。但最具吸引力的应用仍然是使用气化-联合循环装置 (IGCC) 发电。在联合循环发电设备内，合成气在气轮机（具有燃烧室，可处理低热值和高热值的气体）内燃烧发电。较热的烟道气用于产生蒸汽，这些蒸汽可以现场利用或用蒸汽轮机来发电（联合循环）。热电联产的效率可达到 75% (低位热值, LHV)，就发电本身而言效率为 38%~39% (Marano, 2003)。

夹带床 IGCC 技术起初是专门为炼厂开发的，但是也可用于煤气化工艺。因此，气化技术的开发商主要有 Shell、Texaco 这样的石油公司。与燃烧渣油相比，

IGCC 具有低成本减排(Sox, NOx)的特点, 在处理渣油和重组分的同时, 还能为炼油厂发电和/或提供原料。

位于荷兰 Pernis 的 Shell 炼油厂使用了 IGCC 技术, 主要是利用从加氢裂化反应器排出的渣油以及其它渣油产生 110 MWe 的电能和 285 吨的氢气。位于意大利的 IPA Falconara 炼油厂使用 IGCC 技术来处理减粘裂化装置产生的渣油, 并以此产生 241 MWe 的电(Cabooter, 2001)。Baytown (ExxonMobil, 美国得克萨斯)、Deer Park (Shell, 美国得克萨斯)、Sannazzaro (Agip, 意大利)、Lake Charles (Citgo, 美国路易斯安娜) 以及 *Bulwer Island* (BP, 澳大利亚)的炼油厂有的已经安装了 IGCC 装置, 有的正在建设中。

IGCC 的投资成本根据能力和产品的不同有着很大的不同。建设一座日处理重质渣油 2000 吨的气化装置, 其投资成本以生产氢气价值计算为 2.29 亿美元, 而一套 IGCC 装置则需 3.47 亿美元。运行成本的节约取决于电价、天然气成本以及重油处理和加工成本。

其它途径

工艺过程改变和设计

脱盐器。 脱盐工艺的可替代设计包括多级脱盐器和直交流两用脱盐装置。这些工艺可能会提高能效, 降低能耗(IPPC, 2002)。

催化重整装置- 提高产品收成率。 重整反应器的产品回收率可能会受蒸馏(用于分离不同产品)温度的限制。关于美国科罗拉多州 Commerce 市的科罗拉多炼油厂(现由 Valero 公司管理)重整反应器的分析报告表明: 随着夏季温度的上升, LPG 的损失在增加。LPG 或者被放空烧掉, 或者用作燃料气体。于是, 该炼油厂就安装了一套余热驱动的制冷系统(氨吸热), 通过对该系统压缩机、不饱和轻循环油蒸汽的改进, 降低了产品的回收温度(Petrick and Pellegrino, 1999)。热泵使用由重整反应器产生的 140°C 的余热来驱动压缩机。该系统在 1997 年建成, 作为一项示范工程, 并得到了美国能源部的支持。此项目每年节约 6.5 万桶的 LPG。LPG 的回收率随环境温度的变化而变化。回收的 LPG 中含有较高比例的长链烃(C₅, C₆+)产品, 投资回收期估计为 1.5 年 (Brant 等, 1998)。

加氢反应器。 随着低硫燃料油的需求日益增加，直脱硫技术越来越受到关注。目前，直脱硫过程主要由加氢反应器来完成。加氢反应器直接(燃料、蒸汽、电力)或者间接地(氢气)耗费了大量的能源。直脱硫的各种替代方案正在开发，主要有三条工艺路线：高级加氢精制(新型催化剂、催化蒸馏、工艺条件温和)、活化吸附(吸附剂类型，工艺设计)和直接氧化脱硫(催化剂，工艺设计)。这些概念目前正在世界范围内进行示范。高级加氢精制工艺已由 CDTech 公司开发，并且在美国得克萨斯州的 Port Arthur(Babbich and Moulijn, 2003)、加拿大 New Brunswick 省的 Saint John(Gardner 等, 2001)的炼油厂已经开始示范。菲利普石油公司开发了一种吸附工艺(S Zorb)，并在美国得克萨斯州的 Borger 炼油厂示范(Gislason, 2001)。生物脱硫工艺已在美国路易斯安娜州的 Valero's Krotz Springs 示范。

S Zorb 工艺是在流化床反应器中应用一种吸附剂。菲利普石油公司认为该工艺能够在生产低硫汽油和柴油的同时大量减少氢的消耗(Gislason, 2001)。S Zorb 的工艺特征与特定的加氢反应器进行粗略的比较发现，S Zorb 工艺的燃料消耗和电力消耗更低，但水消耗增加。

生物脱硫。当其它加氢反应器的替代方案还处于发展阶段时，生物脱硫工艺将会成为工艺发展的一个巨大突破。生物脱硫的工艺条件温和对氢气的需求量小。这两个优势都能极大的起到节能作用。生物催化脱硫(BDS)为替代加氢精制工艺，提供了一条低成本的路线方案，并能够节约资本、降低运行成本(美国能源部-国际贸易局, 2003c)。以前的一项研究已经为该工艺开发出了一套设计方案，并且进行了经济评价(Enchira, 2003)。这种工艺所面临的挑战是：开发出能够把汽油中的硫降到足够低的水平，并能满足燃料标准要求的细菌，同时还要获得足够高的脱硫率(Borole 等, 2003)。其他的挑战包括了生物催化的稳定性、油水分离和产品的收成率。该工艺的优势包括：反应在常温常压下进行，产物是无毒的生物产品。一座日产量为 2.5 万桶的生物脱硫装置，到 2015 年时其投资成本有望实现回收 1800 万美元。节能效率可达 10%~15%，预期投资回收期低于 2 年(Martin 等, 2000)。

可替代的生产流程

FCC – 改变加工流程。 随着时间的变化，产品质量要求和 FCC 的原料都会发生变化。工艺设计也应随之变化。增加或改变中段回流的数量能够提高 FCC

的能效，也能增加回收热(Golden and Fulton, 2000)。中段回流数的改变可能会影响热汇和热源之间的潜在结合。

新的工艺设计和操作工具能使 FCC 的运行条件得到优化，从而提高产品产率。Petrick and Pellegrino (1999)引用的一些研究成果表明：对 FCC 装置进行优化能够使每桶重油的高辛烷值汽油和烷基化合物的产率从 3%提高到 7%。这些优化措施包括适当地改造设备、修改操作等条件以获得节能的效果。

其它途径

火炬气系统优化。火炬气通过燃烧或氧化的方法，把可燃气体安全地处理掉，避免气体排放到大气环境中。所有的炼厂都有火炬气。在大多数炼厂，当发生系统爆炸时火炬可以烧掉可燃气体。旧的火炬气系统都有引燃火焰，这些引燃火焰不停的燃烧，浪费了大量的天然气。如果引燃火焰熄灭，又会使甲烷（主要的温室气体）白白的排放到环境中。

现代的火焰引燃装置效率更高。由带有火焰探测器的电子点火装置引燃，并可以随时关闭可燃气体，减少甲烷的排放。该系统每小时平均减少 47 MJ 的天然气用量。引燃系统使用电能较少，利用光伏系统（太阳能电池）就可供电，这使得系统不用依靠外部供电。

Chevron 公司在一家炼油厂用电子引燃系统替换了原有的连续燃烧火炬，结果每年可节约 177 GJ 的能量，其投资回收期小于 3 年。

储热柜。为控制存储介质的粘度，一些炼厂的储热柜保持在较高温度状态下。保温性能好的储热柜可以极大地降低能源的损失。

对位于美国犹他州北盐湖城地区的 Fling J 炼油厂审计，结果表明对一台容量为 8 万桶的储热柜顶部进行保温处理，即便是储热柜的温度达到了 107°F，每年也能节约资金 14.8 万美元 (Brueske 等, 2002)。

致谢

本项工作通过美国能源部，获得能源基金会与美国环境保护局的支持，以及陶氏化学公司慈善捐款的资助，合同编号为 DE-AC02-05CH11231。

参考文献

- Abrardo, J.M. and V. Khuruna. 1995. Hydrogen Technologies to meet Refiners' Future Needs. *Hydrocarbon Processing* 2 **74** pp.43-49 (February 1995).
- Al-Riyami, B.A., J. Klemes and S. Perry. 2001. Heat Integration Retrofit Analysis of a Heat Exchanger Network of a Fluid Catalytic Cracking Plant. *Applied Thermal Engineering* **21** pp.1449-1487.
- Alesson, T. 1995. "All Steam Traps Are Not Equal." *Hydrocarbon Processing* **74**.
- Anaheim Public Utilities. (2001). http://www.anaheim.net/utilities/adv_svc_prog/led_exit_sign/howitworks.html
- Babbich, I.V. and J.A. Moulijn. 2003. Science and Technology of Novel Processes for Deep Desulfurization of Oil Refinery Streams: A Review. *Fuel* **82** pp.607-631.
- Baen, P.R. and R.E. Barth. 1994. "Insulate Heat Tracing Systems Correctly." *Chemical Engineering Progress*, September, pp.41-46.
- Baker, R.W., K.A. Lokhandwala, M.L. Jacobs, and D.E. Gottschlich. 2000. Recover Feedstock and Product from Reactor Vent Streams. *Chemical Engineering Progress* **12** **96** pp.51-57 (December 2000).
- Barletta, A.F. 1998. Revamping Crude Units. *Hydrocarbon Processing* 2 **77** pp.51-57 (February 1998).
- Best Practice Programme. 1996. Good Practice Case Study 300: Energy Savings by Reducing the Size of a Pump Impeller. Available for download at <http://www.energy-efficiency.gov.uk/index.cfm>.
- Best Practice Programme. 1998. Good Practice Guide 249: Energy Savings in Industrial Water Pumping Systems. Available for download at <http://www.energy-efficiency.gov.uk/index.cfm>
- Bloss, D., R. Bockwinkel, and N. Rivers, 1997. "Capturing Energy Savings with Steam Traps." *Proc. 1997 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, ACEEE, Washington DC.
- Borole, A.P., C.Y. Hamilton, K. Miller, B. Davison, M. Grossman and R. Shong. 2003. Improving Enzyme Activity and Broadening Selectivity for Biological Desulfurization and Upgrading of Petroleum Feedstocks. University of Tennessee, Knoxville, TN.

- Bott, T.R. 2001. To Foul or not to Foul, That is the Question. *Chemical Engineering Progress* 11 **97** pp.30-36 (November 2001).
- Brant, B., et al. 1998. New Waste Heat Refrigeration Unit Cuts Flaring, Reduces Pollution. *Oil & Gas Journal*, May 18th, 1998.
- Bristol Park Industries. (2002). Website: <http://www.wattman.com/>.
- Bronhold, C.J. 2000. Flash Steam Recovery Project. *Proc. 22nd Industrial Energy Technology Conference*, Houston, TX, April 5-6, 2000.
- Brueske, S.M., S. Smith and R. Brasier. 2002. DOE-sponsored Energy Program Yields Big Savings for Flying J Refinery. *Oil & Gas Journal*, December 2nd, 2002, pp.62-67.
- Cabooter, A.A.A., D. Brkic, D.C. Cooperberg and K. Sep. 2001. IGCC is Environmentally Friendly Choice in Polish Refinery. *Oil & Gas Journal*, February 26th, 2001, pp.58-63.
- California Energy Commission (CEC) and the Office of Industrial Technologies (OIT), U.S. Department of Energy. 2001. Case Study: Pump System Retrofit Results in Energy Savings for a Refinery, August 2001.
- California Energy Commission (CEC) and the Office of Industrial Technologies (OIT), Energy Efficiency and Renewable Energy, U. S. Department of Energy. 2002. Case Study: Pump System Controls Upgrade Saves Energy at a Network Equipment Manufacturing Company's Corporate Campus. January 2002.
- California Energy Commission. 2003. Lighting Efficiency Information. Information and reports can be accessed through:
<http://www.energy.ca.gov/efficiency/lighting/>
- Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC). 2001. Boilers and Heaters, Improving Energy Efficiency. Natural Resources Canada, Office of Energy Efficiency, Ottawa, Ontario, Canada.
- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET). 1993. Proceedings IEA Workshop on Process Integration, International Experiences and Future Opportunities, Sittard, the Netherlands.
- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET). 1994. High Efficiency Motors for Fans and Pumps. Case study UK94.502/2B.FO5.

- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADET). 1997. Saving Energy with Efficient Compressed Air Systems (Maxi Brochure 06), Sittard, the Netherlands.
- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADET). 1997b. Keeping a Steam Boiler on Hot Standby (Project NL-1990-044). Project description can be downloaded from www.caddet.org.
- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADET). 2000. Energy Saving Using Model-Based Predictive Control. Caddet. Available at: <http://www.caddet.org/infostore/display.php?id=3946>
- Caffal, C. 1995. “*Energy Management in Industry.*” CADET, Sittard, the Netherlands.
- Cheng, R., 1999. Low Emissions Burners. *EETD Newsletter*, Summer 1999, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Clayton, R.W., 1986. Cost Reduction on an Oil Refinery Identified by a Process Integration Study at Gulf Oil Refining Ltd., Energy technology Support Unit, Harwell, United Kingdom.
- Copper Development Association (CDA). 2000. Cummins Engine Company Saves \$200,000 per Year with Energy-Efficient Motors. Case Study A6046.
- Copper Development Association (CDA). 2001. High-Efficiency Copper-Wound Motors Mean Energy and Dollar Savings. <http://energy.copper.org/motorad.html>.
- Council of Industrial Boiler Owners (CIBO). 1998. Personal communication by author of previous report, Ernst Worrell.
- Department of Environmental Quality (DEQ), State of Michigan. (2001). Paint Booth Lighting Retrofit Reduces Energy Consumption at Ford Manufacturing Plants. (Ford Motor Company Pollution Prevention Case Studies). <http://www.deq.state.mi.us/ead/p2sect/auto/ford/fmc031.pdf>
- Dorgan, J.R., J.D. Way, P. Bryan, G. Huff, F. Stewart. 2003. Energy Saving Technologies for the Petroleum Refining Industry: An Industry-University-National Laboratory Partnership. Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Dunn, R.F. and G.E Bush. 2001. Using Process Integration Technology for CLEANER production. *Journal of Cleaner Production* 19 pp.1-23.

Easton Consultants, Inc. 1995. Strategies to Promote Energy-Efficient Motor Systems in North America's OEM Markets. Stamford, CT.

Eley, C. and T. M. Tolen, of Eley Associates; J. R. Benya of Luminae Souter Lighting Design; F. Rubinstein and R. Verderber of Lawrence Berkeley Laboratory. (1993). Advanced Lighting Guidelines: 1993. Prepared for the Department of Energy (DOE), California Energy Commission (CEC) and Electric Power Research Institute (EPRI).

Elliot, N. R. 1994. Electricity Consumption and the Potential for Electric Energy Savings in the Manufacturing Sector. ACEEE, Washington, D.C.

Enchira Biotechnology Corporation. 2003. Gasoline Biodesulfurization (Final Report). The Woodlands, TX.

Ezersky, A., 2002. Technical Assessment Document: Further Study Measure 8 Flares (draft). Bay Area Air Quality Management District, San Francisco, CA.

Fisher, P.W. and D. Brennan. 2002. Minimize Flaring with Flare Gas Recovery. *Hydrocarbon Processing* 6 **81** pp.83-85 (June 2002).

Flygt, ITT Industries. 2002. Case Study: Flygt Helps City of Milford Meet the Challenge. Available at www.flygt.com.

Frangopoulos, C.A., A. Lygeors, C.T. Markou and P, Kaloritis. 1996. Thermoeconomic Operation Optimization of the Hellenic Aspropyrgos Refinery Combined Cycle Cogeneration System. *Applied Thermal Engineering* 12 **16** pp.949-958.

Ganapathy, V. 1994. "Understand Steam Generator Performance." *Chemical Engineering Progress*

Gardner, R., E.A. Schwarz and K.L. Rock. 2001. Canadian Refinery starts up First-of-a-kind Gasoline Desulfurization Unit. *Oil & Gas Journal*, June 18th, 2001, pp.54-58.

Garg, A. 1998. Revamp Fired Heaters to Increase Capacity. *Hydrocarbon Processing* 6 **77** pp.67-80 (June 1998).

General Motors (GM). (2001). Resource Conservation/Pollution Prevention/Energy Management. General Motors website. <http://www.gm.com/company/environment> or

http://www.gm.com/company/gmability/environment/env_annual_report/ehsreport/html/sec07/content03.htm

Gislason, J. 2001. Philips Sulfur-Removal Process nears Commercialization. *Oil & Gas Journal* **99**, November 19th, 2001, pp.72-76.

Glazer, J.L., M.E. Schott and L.A. Stapf, 1988. Hydrocracking? Upgrade Recycle. *Hydrocarbon Processing* **10 67** pp.61-61 (October 1988).

Goetze, L. and O. Bailer. 1999. Reactive Distillation with Katapak-S. Sulzer Technical Review 4 (1999), pp.29-31.

Golden, S.W. and S. Fulton. 2000. Low-Cost Methods to Improve FCCU Energy Efficiency. *Petroleum Technical Quarterly*, Summer 2000, pp.95-103.

Hall, S.G., T.P. Ognisty and A.H. Northrup. 1995. Use Process Integration to Improve FCC/VRU Design (Part 1). *Hydrocarbon Processing* **3 74** pp.63-74 (March 1995).

Hallale, N., 2001. Burning Bright: Trends in Process Integration. *Chemical Engineering Progress* **7 97** pp.30-41 (July 2001).

Hartwig, J.W. ChevronTexaco, Richmond Refinery, Richmond, CA. Letter to Bay Area Air Quality Management District Study in response to the Technical Assessment Document (Ezersky, op cit.), February 6th, 2003.

Heijkers, C., E. Zeemering and W. Altena. Consider Variable-Speed, Motor-Driven Compressors in Refrigeration Units. *Hydrocarbon Processing* **8 79** pp.61-64 (August 2000).

Hodgson, J. and T. Walters. 2002. Optimizing Pumping Systems to Minimize First or Life-Cycle Costs. *Proc. 19th International Pump Users Symposium*, Houston, TX, February 25th-28th, 2002.

House, M.B., S.B. Lee, H. Weinstein and G. Flickinger. 2002. Consider Online Predictive Technology to reduce Electric Motor Maintenance Costs. *Hydrocarbon Processing* **7 81** pp.49-50 (July 2002).

Hovstadius, G. of ITT Fluid Technology Corporation. 2002. Personal communication.

Huangfu, E. (U.S. Department of Energy). 2000. Personal communication. August.

Hydraulic Institute and Europump. 2001. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Parsippany, NJ.

- Hydraulic Institute. 1994. Efficiency Prediction Method for Centrifugal Pumps. Parsippany, NJ.
- Hydrocarbon Processing (HCP). 2000. Refining Processes 2000. *Hydrocarbon Processing* 11 **79** pp.87-142 (November 2000).
- Hydrocarbon Processing (HCP). 2001. Advanced Control and Information Systems 2001. *Hydrocarbon Processing* 9 **80** pp.73-159 (September 2001).
- Industrial Assessment Center. 1999. "Industrial Assessment Center Database." http://oipea-www.rutgers.edu/site_docs/dbase.html
- Ingersoll Rand. 2001. Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics. <http://www.air.ingersoll-rand.com/NEW/pedwards.htm>. June 2001.
- Integrated Pollution and Prevention Control. 2002. Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas Refineries. Joint Research Centre, European Commission, Seville, Spain.
- Johnston, B., 1995. "5 Ways to Greener Steam." *The Chemical Engineer* **594** (August) pp.24-27.
- Jones, T. 1997. "Steam Partnership: Improving Steam Efficiency Through Marketplace Partnerships." *Proc. 1997 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, ACEEE, Washington DC.
- Kumana, J. 2000a. Personal communication, 2000.
- Kumana, J. 2000b. Pinch Analysis – What, When, Why, How. Additional publications available by contacting jkumana@aol.com
- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation. (1998). Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry. Prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program.
- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Resource Dynamics Corporation and the Hydraulic Institute. 1999. Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry. Prepared for the U.S. Department of Energy Motor Challenge Program.
- Lee, K.L., M. Morabito and R.M. Wood. 1989. Refinery Heat Integration using Pinch Technology. *Hydrocarbon Processing* 4 **68** pp.49-53 (April 1989).

- Lehman, Bryan and Ernst Worrell. 2001. Electricity Production from Natural Gas Pressure Recovery Using Expansion Turbines, *Proc. 2001 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry – Volume 2*, Tarrytown, NY, July 24-27th, 2001, pp. 43-54.
- Linnhoff, B., D.W. Townsend, D. Boland, G.F. Hewitt, B.E.A. Thomas, A.R. Guy, R.H. Marsland. 1992. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy (1992 edition), Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK.
- Linnhoff, B. 1993. Pinch Analysis: A State-of-the-Art Overview. *Chemical Engineering* **71** (AS): pp.503-522.
- Linnhoff March. 2000. The Methodology and Benefits of Total Site Pinch Analysis. Linnhoff March Energy Services. Paper can be downloaded from: <http://www.linnhoffmarch.com/resources/technical.html>
- Lighting Research Center (LRC). (2001). Lighting Futures. LEDs: From Indicators to Illuminators? 3(4): <http://www.lrc.rpi.edu/Futures/LF-LEDs/index.html>
- Marano, J.J., 2003. Refinery Technology Profiles: Gasification and Supporting Technologies, National Energy Technologies Laboratory, U.S. Department of Energy/Energy Information Administration, Washington, DC, June 2003.
- Martin, N., E. Worrell, M. Ruth, and L. Price, R. N. Elliott, A. M. Shipley, and J. Thorne. 2000. Emerging Energy-Efficient Industrial Technologies. LBNL/ACEEE, Berkeley, CA/Washington, DC.
- Miles, J., 2001. Zero Flaring can Achieve Operational Environmental Benefits. *Oil & Gas Journal*, July 23rd, 2001 pp.72-75.
- Moritz, P. and A. Gorak. 2002. Two in One: Cost Reduction Thanks to Reactive Separation. *Sulzer Technical Review* 1/2000 pp.14-16.
- Onsite Sycom Energy Corp., 2000. The Market and Technical Potential for Combined Heat and Power in the Industrial Sector. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- Panchal, C.B. and E-P. Huangfu, 2000. Effects of Mitigating Fouling on the Energy Efficiency of Crude Oil Distillation. *Heat Transfer Engineering* **21** pp.3-9.
- Parekh, P. (2000). Investment Grade Compressed Air System Audit, Analysis and Upgrade. In: Twenty-second National Industrial Energy Technology Conference Proceedings. Houston, Texas. April 5-6: 270-279.

- Patel, M.R. and N. Nath. 2000. Improve Steam Turbine Efficiency. *Hydrocarbon Processing* 6 **79** pp.85-90 (June 2000).
- Petrick, M and J Pellegrino, 1999. The Potential for Reducing Energy Utilization in the Refining Industry, Report nr. ANL/ESD/TM-158, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.
- Polley, G.T. and H.L. Polley. 2000. Design Better Water Networks. *Chemical Engineering Progress* 2 **96** pp.47-52 (February 2000).
- Polley, G.T. and S.J. Pugh. 2002. Identification of R&D Needs Relating to the Mitigation of Fouling in Crude Oil Pre-Heat Trains. *Proc. 24th Industrial Energy Technology Conference*, Houston, TX, April 16-19, 2002.
- Polley, G.T., S.J. Pugh and D.C King. 2002. Emerging Heat Exchanger Technologies for the Mitigation of Fouling in Crude Oil Preheat Trains. *Proc. 24th Industrial Energy Technology Conference*, Houston, TX, April 16-19, 2002.
- Price, A. and M.H. Ross. (1989). Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study. *The Electricity Journal*. July: 40-51.
- Querzoli, A.L., A.F.A. Hoadley and T.E.S. Dyron. 2002. Identification of Heat Integration Retrofit Opportunities for Crude Distillation and Residue Cracking Units. *Proceedings of the 9th APCCChE Congress and CHEMECA 2002*, 29 September-3 October 2002, Christchurch, NZ
- Radgen, P. and E. Blaustein (eds.). 2001. Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions. Fraunhofer Institute, Karlsruhe, Germany.
- Ratan, S. and C.F. Vales, 2002. Improve your Hydrogen Potential. *Hydrocarbon Processing* 3 **81** pp.57-64 (March 2002).
- Ryans, J. and J. Bays. 2001. Run Clean with Dry Vacuum Pumps. *Chemical Engineering Progress* 10 **96** pp.32-41 (October 2001).
- Scales, B. (2002). Personal written communication.
- Schultz, M.A., D.G. Stewart, J.M. Harris, S.P. Rosenblum, M.S. Shakur and D.E. O'Brien. 2002. Reduce Costs with Dividing-Wall Columns. *Chemical Engineering Progress* 5 **98** pp.64-71 (May 2002).

- Seebold, J.G., R.T. Waibel and T.L. Webster. 2001. Control NO_x Emissions Cost-Effectively. *Hydrocarbon Processing* 11 **80** pp.55-59 (November 2001).
- Saxena, S.K. 1997. Conserve Energy in Distillation. *Chemical Engineering World*, September 1997.
- Shaver, K.G., G.L. Poffenbarger and D.R. Groteworld. 1991. Membranes recover Hydrogen. *Hydrocarbon Processing* 6 **70** pp.77-80 (June 1991).
- Shenoy, U. 1994. Heat Exchanger Network Synthesis. Houston, TX: Gulf Publishing Company.
- Smith, R. 1995. Chemical Process Design. New York, NY: McGraw-Hill Inc.
- Strategic Directions International (SDI), Inc., 1982, Energy Recovery Opportunities in Europe: European Survey Summary, Airco Cryogenics Division, Irvine, California
- Sunden, B. 1988. Analysis of the Heat recovery in Two Crude Distillation Units. *Heat Recovery & CHP Systems* 5 **8** pp.483-488.
- Sundmacher, K. and A. Kienle (eds.). 2003. Reactive Distillation: Status and Future Directions. Wiley Publications, New York, NY (February 2003).
- Taylor, A.J., T.G. La Grange and G.Z. Gous, 2000. Modern Advanced Control Pays Back Rapidly. *Hydrocarbon Processing* 9 **79** pp.47-50 (September 2000).
- Technip, 2000. Progressive Crude Distillation. Leaflet, Technip, Paris, France.
- Terrible, J., G. Shahani, C. Gagliardi, W. Baade, R. Bredehoft and M. Ralston. 1999. Consider Using Hydrogen Plants to Cogenerate Power Needs. *Hydrocarbon Processing* 12 **78** pp.43-53 (December 1999).
- Timmons, C., J. Jackson and D.C. White, 2000. Distinguishing Online Optimization Benefits from Those of Advanced Controls. *Hydrocarbon Processing* 6 **79** pp.69-77 (June 2000).
- Turiel, I., B. Atkinson, s. Boghosian, P. Chan, J. Jennings, J. Lutz, J. McMahon, and G. Rosenquist. (1995). Evaluation of Advanced Technologies for Residential Appliances and Residential and Commercial Lighting. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL #35982). January.

- Tutterow, V. 1999. Energy Efficiency in Pumping Systems: Experience and Trends in the Pulp and Paper Industry. American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE).
- Tutterow, V., D. Casada and A. McKane. 2000. "Profiting from your Pumping System," In Proceedings of the Pump Users Expo 2000. September. Louisville, KY: *Pumps & Systems Magazine*, Randall Publishing Company.
- U.S. DOE-OIT. 1998. Steam Challenge. <http://www.oit.doe.gov/steam/>
- U.S. DOE-OIT, 1999. Motor Systems Upgrades Smooth the Way to Savings of \$700,000 at Chevron Refinery. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2000a. Advanced Process Analysis for Petroleum Refining. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2000b. Energy Tips: Estimate Voltage Unbalance. Information Sheet. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2001a. Installation of Reverse Osmosis Unit Reduces Refinery Energy Consumption. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2001b. High Octane Fuel-Stocks via Reactive Distillation (Project Fact Sheet). Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2002a. Martinez Refinery completes Plant-Wide Energy Assessment. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2002b. Steam System Opportunity Assessment for the Pulp & Paper, Chemical Manufacturing and Petroleum Refining Industries. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2002c. Rotary Burner (Project Factsheet). Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. DOE-OIT, 2002d. Pumps: Cost Reduction Strategies. U.S. Department of Energy, Available at the website www.oit.doe.gov/bestpractices.
- U.S. DOE-OIT, 2003a. Paramount Petroleum: Plant-Wide Energy-Efficiency Assessment Identifies Three Projects. Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.

- U.S. DOE-OIT, 2003b. Retrofit Helps Mobil refinery Avoid a Major capital Investment. Energy Matters, Winter 2003 (Newsletter published by Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy).
- U.S. DOE-OIT, 2003c. Gasoline Biodesulfurization (Project Factsheet). Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2001. “Green Lights Program (Part of the ENERGY STAR Program),” <http://es.epa.gov/partners/green/green.html>.
- Valero, 2003. Valero Energy Corporation Tour Guide Book Houston Refinery. Distributed at the Texas Technology Showcase 2003, Houston, March 17-19, 2003.
- Van de Ruit, H. 2000. Improve Condensate Recovery Systems. *Hydrocarbon Processing* 12 **79** pp.47-53 (December 2000).
- Venkatesan, V.V. and N. Iordanova. 2003. A Case Study of Steam Evaluation in a Petroleum Refinery. *Proc. 25th Industrial Energy Technology Conference*, Houston, TX, May 13-16, 2003.
- Worrell, E. and C. Galitsky. 2004. Profile of the Petroleum Refining Industry in California: California Industries of the Future Program. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, March, LBNL-55450.
- Worrell, E. and C. Galitsky. 2005. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Petroleum Refineries: An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, February, LBNL-56183.
- Worrell, E. and K. Blok. 1994. Energy Savings in the Nitrogen Fertilizer Industry in the Netherlands. *Energy, the International Journal* 2 **19** pp.195-209 (1994).
- Worrell, E., J-W.Bode, and J. de Beer. 1997. Energy Efficient Technologies in Industry (ATLAS project for the European Commission). Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
- Wu, G., 2000. Design and Retrofit of Integrated Refrigeration Systems. Ph.D. Thesis, UMIST, Manchester, UK.

Xenergy, Inc. 1998. United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment. U.S. Department of Energy's Office of Industrial Technology and Oak Ridge National Laboratory.

Zagoria, A. and R. Huycke. 2003. Refinery Hydrogen Management – The Big Picture. *Hydrocarbon Processing* 2 **82** pp.41-46 (February 2003).

Zhang, Y. 2001. Heat-Balance Design in Coker Reduces Energy Consumption. *Oil & Gas Journal* **99** January 1st, 2001, pp.42-44.